

УДК 550.388

Л. Ф. ЧЕРНОГОР<sup>1</sup>, В. В. БАРАБАШ<sup>2</sup>

PACS number: 95.10.Gi

<sup>1</sup> Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,  
пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина  
E-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua

<sup>2</sup> Институт ионосферы НАН и МОН Украины,  
ул. Краснознаменная, 16, г. Харьков, 61002, Украина  
E-mail: iion@kpi.kharkov.ua

## ЭФФЕКТЫ СОЛНЕЧНОГО ЗАТМЕНИЯ 20 МАРТА 2015 г. В ИОНОСФЕРЕ НАД ЕВРОПОЙ: РЕЗУЛЬТАТЫ ИОНОЗОНДОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

*Проанализированы ионограммы одиннадцати европейских ионозондов (Харьков, Москва, Pruhonice, San Vito и др.), полученные в день солнечного затмения 20 марта 2015 г. и в контрольные дни. Особенностью данного затмения было то, что оно протекало на фоне фазы восстановления очень сильной магнитной бури, начавшейся 17 марта 2015 г. Эффекты солнечного затмения в значительной степени маскировались эффектами ионосферной бури. Во время затмения критическая частота  $f_oF_2$  уменьшалась на  $1 \div 2$  МГц ( $15 \div 25$  %), а концентрация электронов – на  $23 \div 51$  %. Высота слоя  $F_2$  увеличивалась на  $10 \div 70$  км ( $3 \div 20$  %).*

*Ключевые слова:* солнечное затмение, ионозонды, критическая частота, вариации действующей высоты, аперiodические возмущения, квазипериодические возмущения

### 1. Введение

Солнечное затмение (СЗ) представляет исследователю уникальную возможность проследить за динамикой системы Земля (ее внутренние оболочки) – атмосфера – ионосфера – магнитосфера и вариациями геофизических полей на интервале времени в несколько часов [1]. Возмущения в этой системе, вызванные различными СЗ, существенно отличаются. Параметры этих возмущений зависят от времени наступления СЗ, состояния космической погоды, сезона, положения в цикле солнечной активности, географических координат и степени покрытия диска Солнца [1].

Исследование эффектов солнечного затмения СЗ в ионосфере имеет столетнюю историю. Первые радиофизические наблюдения эффектов СЗ были выполнены еще в 1912 г. [2]. Сначала изучалось влияние затмений на распространение радиоволн в ионосфере. Начиная с СЗ 31 августа 1932 г. стали изучаться динамические процессы в ионосфере, сопровождающие затмения [3]. Самым распространенным методом наблюдения был метод вертикального зондирования, использующий ионосферные станции (ионозонды) [4–9]. Арсенал используемых методов значительно

расширился в 1960-х гг. Стали широко использоваться спутниковые и ракетные методы [10–14], метод некогерентного рассеяния [15–26], а также целый ряд других методов (см., например, [27–54]).

В этих работах описано уменьшение концентрации электронов во всех областях ионосферы, уменьшение температур электронов и ионов, изменение скорости движения плазмы, потоков плазмы и тепла, генерация волновых возмущений в верхней ионосфере и другие эффекты, сопровождавшие СЗ с различными фазами в различных регионах земного шара.

Результаты ионозондовых наблюдений прежних лет представлены в работах [4–9]. К современным работам относятся [31, 37, 55, 56].

Ионозондовые наблюдения показали, что СЗ сопровождаются рядом устойчивых эффектов: уменьшением концентрации электронов  $N$ , увеличением действующей высоты отражения, запаздыванием уменьшений  $N$  по отношению к моменту наступления максимальной фазы затмения, а также генерацией квазипериодических (волновых) возмущений в ионосфере. В тоже время следует иметь в виду, что каждому затмению присущи свои, индивидуальные, особенности. Спецификой СЗ 20 марта 2015 г. было то, что оно происходило на фоне релак-

сирующей геокосмической бури, начавшейся 17 марта 2015 г.

Цель настоящей работы – анализ результатов ионозондовых наблюдений возмущений в ионосфере над Европой, сопровождавших СЗ 20 марта 2015 г.

## 2. Состояние космической погоды

16 и 17 марта 2015 г. наблюдалось увеличение более чем на порядок концентрации частиц солнечного ветра  $n_{sw}$  (см. рис. 1). 17–22 марта скорость солнечного ветра  $V_{sw}$  возросла в 1.5 раза. 17 марта температура частиц  $T_{sw}$  увеличилась на порядок. Рост концентрации и температуры привел к возрастанию давления газа  $p_{sw}$  в солнечном ветре. 17 марта компонента  $B_z$  межпланетного магнитного поля повернула к югу, т. е. возникла ситуация, когда  $B_z < 0$ . Минимальное значение  $B_z$  составляло  $-15$  нТл. Началась магнитная буря, которая сопровождалась увеличением на 1–2 порядка энергии  $\epsilon_A$ , поступающей в магнитосферу от солнечного ветра, а также значительными изменениями индекса авроральной активности  $AE$ , индексов геомагнитной активности  $K_p$  и  $D_{st}$ . Значения этих индексов достигали 1600 нТл, 8 и  $-230$  нТл соответственно. Добавим, что данная буря – самая сильная в текущем цикле солнечной активности. Буря, постепенно затухая, продолжалась в течение недели. Так, 20 и 21 марта суммарный индекс  $\Sigma K_p$  составлял 27 и 22 соответственно. Днем 20 марта имела место релаксирующая ионосферная буря, точнее ее отрицательная фаза. Значения критической частоты  $f_oF2$  были примерно на  $1 \div 2$  МГц ниже, чем в контрольный день 21 марта.

## 3. Средства и методы

### 3.1. Сеть ионозондов

Для изучения эффектов СЗ 20 марта 2015 г. использовались данные 10 европейских ионозондов, выложенные в сети Интернет <<http://um1car.uml.edu/stationlist.html>>, а также ионозонда Харьков, перечень которых представлен в табл. 1. Из таблицы видно, что затмение имело место в утреннее и дневное время, угловая высота Солнца над горизонтом изменялась от  $17$  до  $51^\circ$ . Макси-

мальная фаза и площадь покрытия варьировались в пределах  $0.43 \div 0.95$  и  $0.32 \div 0.95$  соответственно.

Погрешность измерения частоты и действующей высоты для стандартных ионозондов составляет 25 либо 50 кГц и 5 км соответственно.

### 3.2. Методики обработки

Аналізу подвергнуты временные зависимости критической частоты  $f_oF2$  и высоты  $h_p$  слоя F2 ионосферы. Для изучения регулярного (апериодического) эффекта СЗ анализировались сглаженные скользящим средним на интервале времени 150 мин зависимости  $f_oF2(t)$  и  $h_p(t)$  (тренды). Далее полученные зависимости  $\overline{f_oF2}(t)$  и  $\overline{h_p}(t)$  для 20 марта сравнивались с аналогичными зависимостями для контрольного дня 21 марта 2015 г. Контрольный день 19 марта 2015 г. был слишком возмущенным ( $\Sigma K_p \approx 33$ ,  $K_{pmax} \approx 5$ ,  $AE_{max} \approx 1200$  нТл,  $D_{st\ min} \approx -75$  нТл). Непосредственное сравнение с контрольным днем 21 марта также было малопродуктивным, потому что 20 марта имело место отрицательная ионосферная буря, в результате которой значения  $\overline{f_oF2}(t)$  были занижены на  $\Delta f_oF2 \approx 1 \div 2$  МГц по сравнению со значениями  $\overline{f_oF2}$  для 21 марта, а значения  $h_p$  – завышены на  $\Delta h_p \approx 10 \div 30$  км. Для корректного сравнения сначала компенсировался эффект ионосферной бури увеличением  $\overline{f_oF2}$  и уменьшением  $\overline{h_p}$  для 20 марта на величины  $\Delta f_oF2$  и  $\Delta h_p$ , которые были различными для различных ионозондов. Значения  $\Delta f_oF2$  и  $\Delta h_p$  целесообразно определять по среднеквадратическим отклонениям  $\overline{f_oF2}$  и  $\overline{h_p}$  для 20 и 21 марта в утреннее время, т. е. за несколько часов до наступления СЗ.

Более продуктивным оказался следующий подход. Для выделения эффекта СЗ провалы в зависимости  $\overline{f_oF2}(t)$  и всплески в зависимости  $\overline{h_p}(t)$  сглаживались. Тем самым имитировались зависимости  $\overline{f_oF2}(t)$  и  $\overline{h_p}(t)$ , которые наблюдались бы в отсутствие СЗ. Сглаженные таким образом значения  $\overline{f_oF2}(t)$  и  $\overline{h_p}(t)$  вблизи момента максимальной фазы затмения рассматривались как ожидаемые, т. е. не возмущенные затмением, значения  $(f_oF2)_0$  и  $h_{p0}$ .

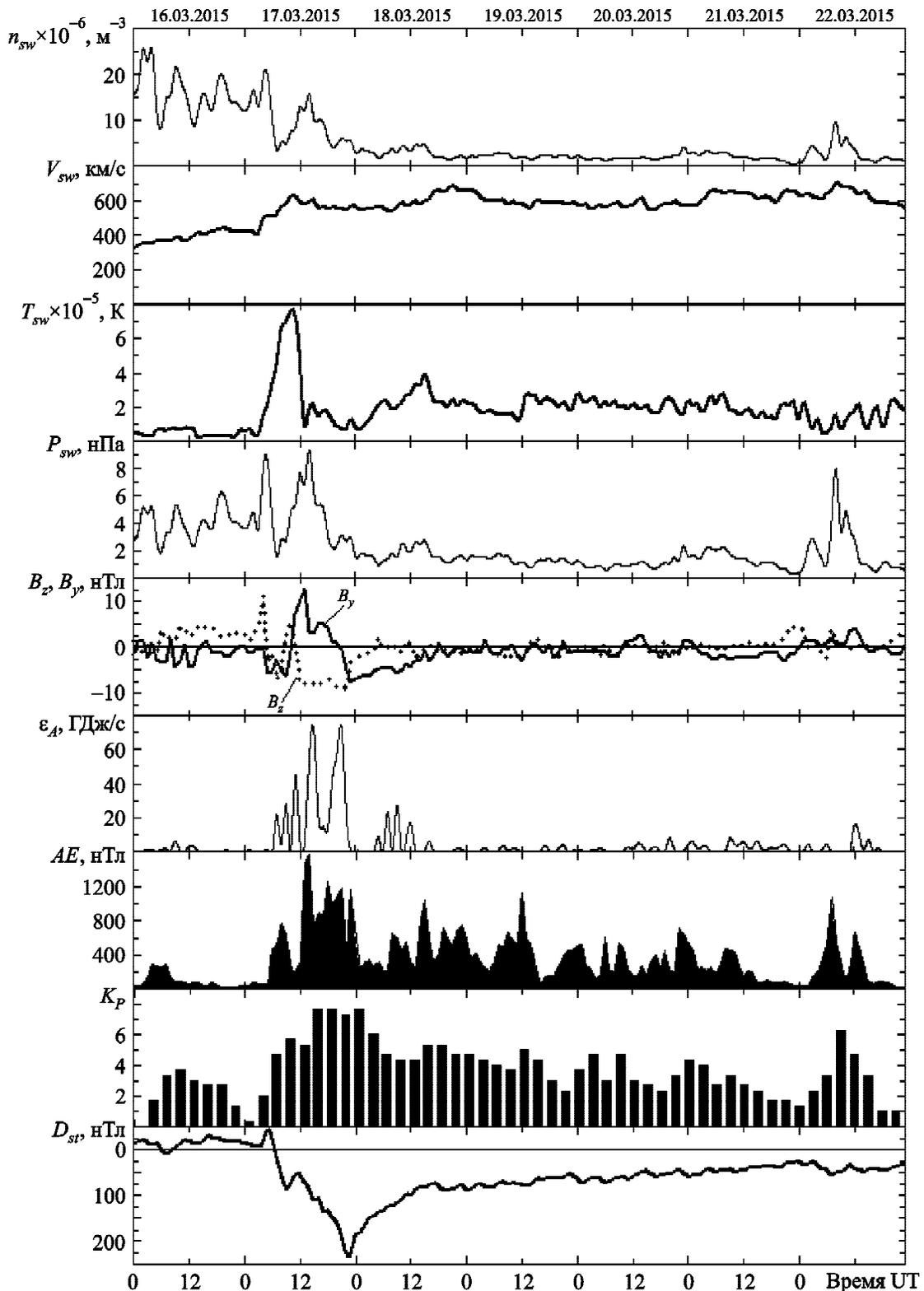


Рис. 1. Временные вариации параметров солнечного ветра в период с 16 по 22 марта 2015 г.: концентрации частиц  $n_{sw}$ , радиальной скорости  $V_{sw}$  (ACE Satellite – Solar Wind Electron Proton Alpha Monitor), температуры  $T_{sw}$  и динамического давления  $p_{sw}$  (расчет), – компонент  $B_y$  (сплошная линия),  $B_z$  (пунктирная линия) межпланетного магнитного поля (ACE Satellite – Magnetometer), функции Акасофу  $\epsilon_A$  (расчет),  $AE$ -индекса (WDC Kyoto),  $K_p$ -индекса (Air Force Weather Agency),  $D_{st}$ -индекса (WDC-C2 for Geomagnetism Kyoto University)

**Таблица 1. Географические координаты (широта  $\phi$  и долгота  $\lambda$  ионозондов, основные сведения о положении Солнца и фазе СЗ. Первый, второй, и третий моменты времени соответствуют началу, максимальной фазе и окончанию СЗ**

Ионозонд	$\phi$	$\lambda$	Время UT наступления события, ч:мин:с	Фаза СЗ	Покрытие диска	Угловая высота Солнца над горизонтом	Азимут Солнца	Дискретность регистрации ионограмм 20/21 марта, мин
Tromsø	69.6° с. ш.	19.2° в. д.	09:04:52 10:08:49 11:13:19	0.95	0.95	17.9° 19.8° 20.1°	152.1° 168.8° 186.0°	15/15
Fairford	51.7° с. ш.	1.5° з. д.	08:24:10 09:29:54 10:39:40	0.88	0.86	19.3° 27.7° 34.5°	116.8° 132.3° 151.1°	15/15
Dourbes	50.1° с. ш.	4.6° в. д.	08:26:25 09:33:42 10:44:48	0.82	0.78	23.8° 32.0° 37.9°	122.3° 138.9° 159.4°	0.5/0.5
Juliusruh	54.6° с. ш.	13.4° в. д.	08:41:34 09:49:53 11:00:29	0.82	0.78	26.9° 32.5° 35.1°	136.2° 154.8° 175.8°	15/15
Pruhonic	50.0° с. ш.	14.6° в. д.	08:36:41 09:45:36 10:57:10	0.74	0.68	30.1° 36.7° 39.7°	134.4° 153.5° 176.1°	3/15
Rocuetes	40.8° с. ш.	0.5° в. д.	08:08:53 09:13:58 10:24:21	0.70	0.64	22.6° 33.5° 43.0°	111.5° 125.3° 144.2°	5/5
ElArinosillo	37.1° с. ш.	6.7° з. д.	07:58:27 09:00:12 10:07:43	0.69	0.62	16.5° 28.1° 39.6°	103.2° 114.2° 129.2°	15/15
Москва	55.5° с. ш.	37.3° в. д.	09:12:25 10:19:38 11:25:57	0.65	0.57	34.1° 33.7° 30.2°	172.2° 192.4° 211.6°	3/15
San Vito	40.6° с. ш.	17.8° в. д.	08:30:25 09:37:23 10:47:23	0.54	0.45	37.4° 45.4° 49.1°	131.5° 151.2° 176.6°	15/15
Харьков	49.6° с. ш.	36.3° в. д.	09:09:25 10:15:52 11:21:33	0.54	0.44	39.6° 39.6° 35.8°	169.3° 190.9° 211.2°	5/5
Athens	38.0° с. ш.	23.5° в. д.	08:39:15 09:43:13 10:49:11	0.43	0.32	43.6° 50.1° 51.6°	138.6° 160.1° 186.3°	2/5

Для изучения квазипериодических (волновых) возмущений в ионосфере анализировались зависимости  $\delta f_o F2(t) = f_o F2(t) - \overline{f_o F2}(t)$  и  $\delta h_p(t) = h_p(t) - \overline{h_p}(t)$ , которые далее подвергались системному спектральному анализу [57]. В настоящей работе мы ограничились использованием оконного и адаптивного преобразований Фурье (ОПФ и АПФ соответственно), а также

вейвлет-преобразования (ВП) на основе вейвлета Морле.

#### 4. Результаты наблюдений

##### 4.1. Временные вариации критической частоты $f_o F2$

Временные зависимости критической частоты  $f_o F2$ , а также ее сплаженных скользящим сред-

ним значений для 11 европейских ионозондов приведены на рис. 2 и рис. 3. Из этих рисунков видно, что 20 марта 2015 г. сглаженные зависимости  $\overline{f_oF2}(t)$  имели провал вблизи максимальной фазы СЗ.

Для ионозонда Харьков провал замаскирован положительным возмущением, которое наблюдалось в интервале времени 10:00–10:50. В отсутствие этого возмущения значение  $(f_oF2)_{\min}$  составило бы 7.8 МГц, а без СЗ  $(f_oF2)_0 \approx 8.3$  МГц.

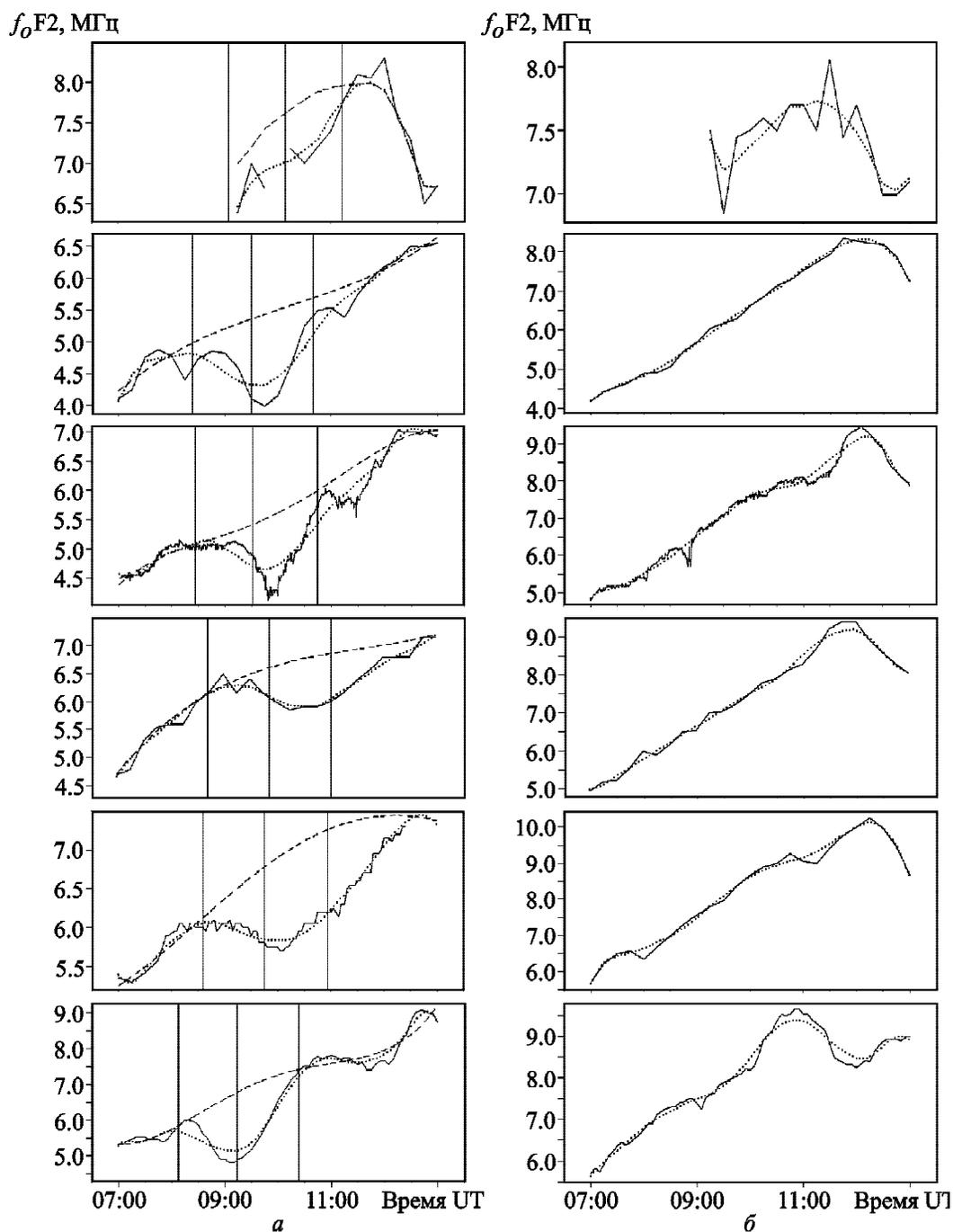
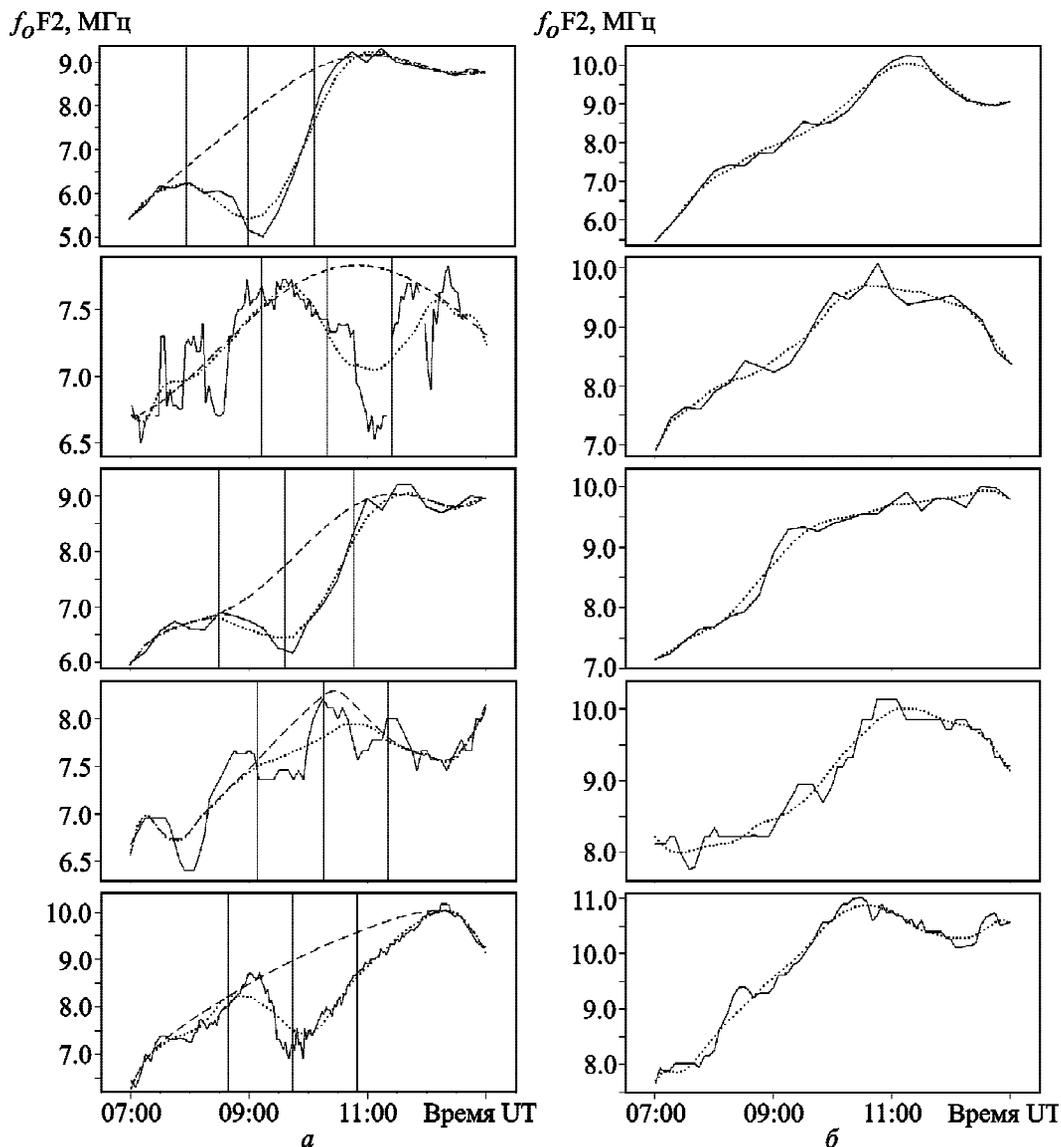


Рис. 2. Временные зависимости критической частоты (сплошная линия) и сглаженной скользящим средним критической частоты (пунктирная линия) для ионозондов (панели сверху вниз) Tromsø, Fairford, Dourbes, Juliusruh, Pruhonice, Rocuetes: а – 20 марта 2015 г., б – 21 марта 2015 г. Штриховая линия описывает ожидаемые вариации  $f_oF2(t)$  в отсутствие СЗ. Вертикальными линиями здесь и далее показаны моменты времени начала, максимальной фазы и окончания СЗ



**Рис. 3.** Временные зависимости критической частоты (сплошная линия) и сглаженной скользящим средним критической частоты (пунктирная линия) для ионозондов (панели сверху вниз) El Aginosillo, Москва, San Vito, Харьков, Athens: *a* – 20 марта 2015 г., *б* – 21 марта 2015 г. Штриховая линия описывает ожидаемые вариации  $f_oF2(t)$  в отсутствие СЗ

Именно эти значения далее использовались при оценке отношения  $N_{\min}/N_0$  (см. табл. 2).

Минимальные значения  $\overline{f_oF2}$  наблюдались с временем запаздывания  $\Delta t \approx 5 \div 30$  мин после наступления максимальной фазы затмения (табл. 2).

Заметим, что подобные провалы в зависимости  $f_oF2(t)$ , в контрольный день 21 марта 2015 г. отсутствовали.

Кроме регулярного поведения  $f_oF2(t)$ , имели место квазипериодические вариации критической частоты.

#### 4.2. Временные вариации приращений критической частоты $f_oF2$

Временные вариации приращений критической частоты  $\delta f_oF2$  20 и 21 марта 2015 г. приведены на рис. 4. Из рис. 4 можно видеть, что характер квазипериодических вариаций в день затмения и в контрольный день заметно отличались. В день затмения временные вариации были более регулярными, более четко наблюдались квазипериодические вариации, амплитуда  $\delta f_a$  этих вариаций была в  $2 \div 3$  раза больше, чем в контрольный день (см. табл. 3). Кроме того, заметно отлича-

**Таблица 2. Вариации основных параметров ионограмм: наблюдаемых ( $N_{\min}/N_0$ ) и вычисленных ( $N_{\min}/N_0$ )<sub>cal</sub> относительных концентраций электронов, ожидаемого  $(f_oF2)_0$  и реального  $(f_oF2)_{\min}$  значений критической частоты в контрольный день и день затмения вблизи максимальной фазы СЗ, а также максимального приращения высоты ( $\Delta h_{p\max}$ ) в день СЗ, времени запаздывания ( $\Delta t$ ) значений  $(f_oF2)_{\min}$  по отношению к моменту максимальной фазы СЗ и отношения коэффициентов линейной рекомбинации в контрольный день ( $\beta_0$ ) и день СЗ ( $\beta$ )**

Ионозонд	$(f_oF2)_0$ , МГц	$(f_oF2)_{\min}$ , МГц	$\frac{N_{\min}}{N_0}$	$\left(\frac{N_{\min}}{N_0}\right)_{cal}$	$\Delta h_{p\max}$ , км	$\Delta t$ , мин	$\beta_0/\beta$
Tromsø	8	7.0	0.77	0.05	40	30	15.4
Fairford	5.3	4.1	0.60	0.14	50	15	4.3
Dourbes	5.3	4.25	0.49	0.22	22	15	2.2
Juliusruh	6.8	5.9	0.75	0.22	25	30	3.4
Pruhonicе	6.7	5.8	0.75	0.32	25	30	2.3
Rocuetes	6.5	4.8	0.55	0.36	75	5÷10	1.5
El Arinosillo	7.9	5.0	0.40	0.38	70	15	1.05
Москва	7.8	6.9	0.78	0.43	10	30	1.8
San Vito	8.2	6.2	0.57	0.55	50	5÷10	1.04
Харьков	8.3	7.8	0.88	0.56	25	15	1.6
Athens	8.7	7.2	0.62	0.68	15	20	1

лись периоды квазипериодических колебаний  $T_f$  в день затмения и в контрольный день (табл. 3).

#### 4.3. Временные вариации высоты $h_p$

Временные вариации высоты  $h_p$  для 20 и 21 марта 2015 г. приведены на рис. 5 и рис. 6. Из рисунков видно, что для всех ионозондов значение  $h_p$  в течение СЗ превышало на 40 ÷ 70 км значение  $h_p$  в контрольный день, а также на 25 ÷ 50 км значение  $h_p$ , которое наблюдалось бы в отсутствие СЗ. Кроме регулярного увеличения  $h_p$ , наблюдавшегося в течение затмения, высота  $h_p$  испытывала квазипериодические вариации с амплитудой 15 ÷ 30 км и квазипериодом 45 ÷ 90 мин. Значения амплитуд  $\delta h_{pa}$  и квазипериодов  $T_h$  в день затмения и в контрольный день несколько отличались (см. табл. 3).

#### 4.4. Временные вариации приращений высоты $\delta h_p$

Временные вариации приращений высоты  $\delta h_p$  для 20 и 21 марта 2015 г. приведены на рис. 7. Из рисунка видно, что значения амплитуды  $\delta h_{pa}$  в день затмения и в контрольный день заметно отличались. Амплитуда  $\delta h_p$  была в среднем в 1.5 ÷ 2 раза больше в день затмения, чем в контрольный день (см. также табл. 3). Значения квазипериода  $T_h$  в день СЗ и 21 марта 2015 г. отличались незначительно (см. табл. 3). Значения

квазипериода, вычисленные по вариациям  $\delta f_oF2$  и  $\delta h_p$ , были близкими (табл. 3).

### 5. Результаты системного спектрального анализа

#### 5.1. Спектральный анализ зависимостей $\delta f_oF2(t)$

Примеры результатов системного спектрального анализа вариаций  $\delta f_oF2(t)$  для ионозондов San Vito и Pruhonicе приведены на рис. 8 и рис. 9 соответственно. Из рисунков можно видеть, что в течение СЗ спектральный состав и амплитуды колебаний существенно изменялись. Так, для ионозонда San Vito на смену колебанию с  $T_f \approx 50 \div 60$  мин пришло колебание с  $T_f \approx 75 \div 120$  мин (см. рис. 8). Малая частота регистрации ионограмм (1 ионограмма за 15 мин), к сожалению, не позволила точнее оценить период  $T_f$ . На ионозонде Pruhonicе интервал между регистрациями ионограмм составлял 3 мин, что обеспечило более качественные результаты спектрального анализа (см. рис. 9). Из рис. 9 четко видно, что в течение СЗ усилилось колебание с  $T_f \approx 80 \div 90$  мин. Основные результаты спектрального анализа представлены в табл. 3.

Сравнение амплитуд и периодов колебаний для 20 и 21 марта 2015 г. показало, что в день СЗ они заметно отличались от тех, что были в контрольный день.

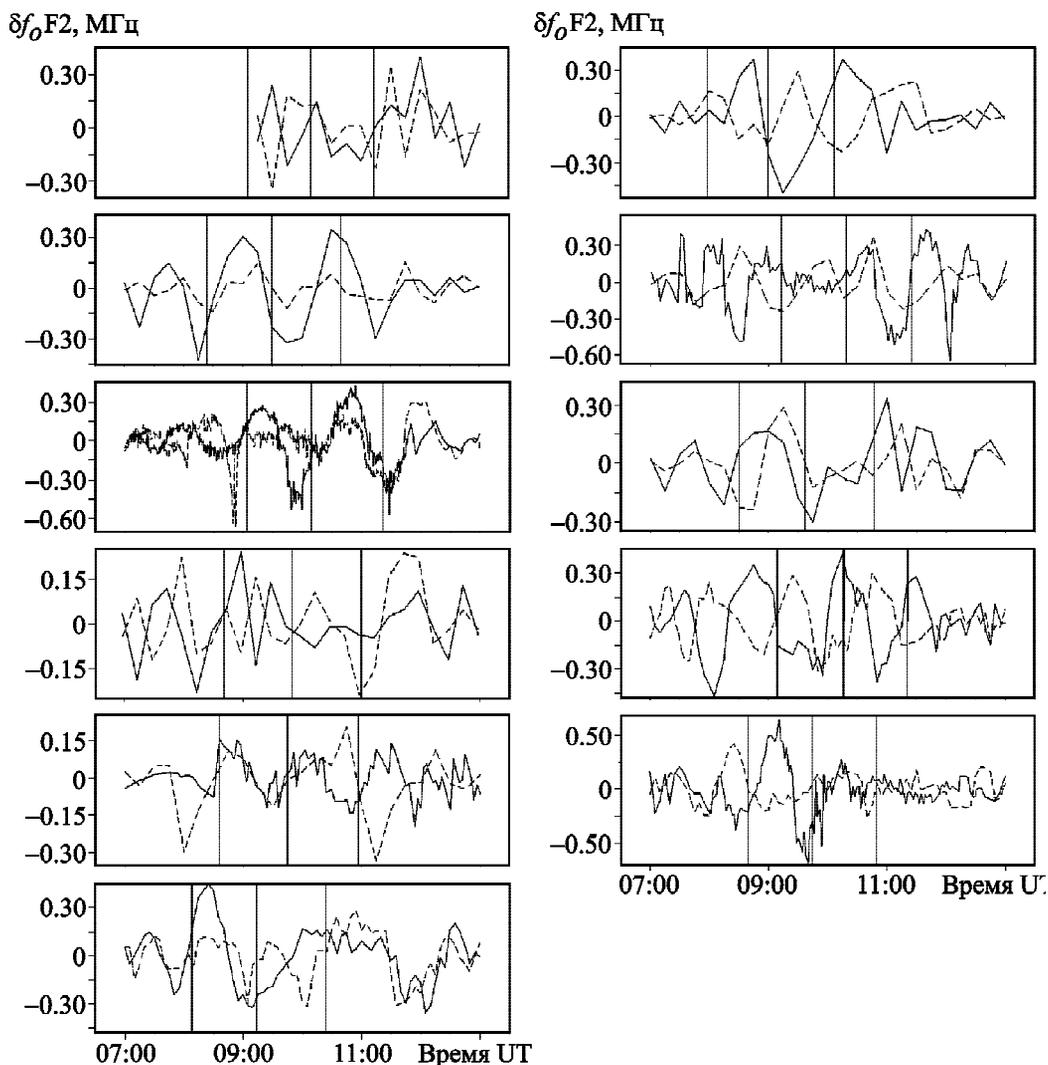


Рис. 4. Временные вариации приращения критической частоты 20 марта 2015 г. (сплошная линия) и 21 марта 2015 г. (штриховая линия) для ионозондов Tromsø, Fairford, Dourbes, Juliusruh, Pruhonice, Rocuetes (левая панель) и El Arinosillo, Москва, San Vito, Харьков, Athens (правая панель)

## 5.2. Спектральный анализ зависимостей $\delta h_p(t)$

Примеры результатов системного спектрального анализа вариаций  $\delta h_p(t)$  для ионозондов San Vito и Москва приведены на рис. 10 и рис. 11 соответственно. Из рис. 10 видно, что СЗ сопровождалось заметными изменениями спектрального состава и амплитуд колебаний, в течение затмения усилилось колебание с  $T_h \approx 45 \div 75$  мин, его амплитуда увеличилась вдвое. Из рис. 11 видно, что в течение СЗ мощное колебание с амплитудой около  $20 \div 25$  км и  $T_h \approx 45 \div 60$  мин распалось на два колебания с  $T_h$  около 30 и 60 мин и амплитудами около 10 и 15 км соответственно.

Об этом же свидетельствует и сравнение спектрограмм для 20 и 21 марта 2015 г. Данные об амплитудах и периодах, полученные по результатам системного спектрального анализа, сведены в табл. 3.

## 6. Обсуждение

Проведенный анализ временных вариаций  $\delta f_oF2(t)$  и  $h_p(t)$  подтвердил, что СЗ привело к уменьшению концентрации электронов на десятки процентов, увеличению  $h_p$  на  $40 \div 70$  км относительно значений в контрольный день, а также к генерации квазипериодических возмущений  $f_oF2$ , т. е. концентрации электронов,

Таблица 3. Основные параметры квазипериодических возмущений в ионосфере

Ионозонд	20 марта 2015 г.				21 марта 2015 г.			
	$T_f$ , мин	$T_h$ , мин	$\delta f_a$ , МГц	$\delta h_{pa}$ , км	$T_f$ , мин	$T_h$ , мин	$\delta f_a$ , МГц	$\delta h_{pa}$ , км
Tromsø	30 ÷ 40	45 ÷ 60	0.2	10 ÷ 15	60	60	0.15 ÷ 0.2	10
Fairford	80 ÷ 100	30 ÷ 45	0.3	25 ÷ 30	75	60	0.1	15 ÷ 20
Dourbes	80 ÷ 100	50 ÷ 60	0.2 ÷ 0.4	10 ÷ 25	60	30 ÷ 40	0.15 ÷ 0.20	10 ÷ 15
Juliusruh	50 ÷ 70	45 ÷ 60	0.15 ÷ 0.20	10 ÷ 15	60 ÷ 80	30 ÷ 60	0.10 ÷ 0.20	10
Pruhonic	80 ÷ 90	40 ÷ 60	0.15	10 ÷ 20	60 ÷ 120	45 ÷ 60	0.10 ÷ 0.20	10
Rocuetes	60 ÷ 90	30 ÷ 60	0.25 ÷ 0.35	10 ÷ 15	60	45 ÷ 60	0.2	10
El Arinosillo	60 ÷ 90	30 ÷ 45	0.3 ÷ 0.4	5 ÷ 10	90	30 ÷ 45	0.15 ÷ 0.2	5 ÷ 7
Москва	50 ÷ 60	45 ÷ 60	0.4	20 ÷ 25	50 ÷ 60	45 ÷ 60	0.2 ÷ 0.3	15
San Vito	40 ÷ 60	45 ÷ 75	0.2	10 ÷ 20	45 ÷ 75	45 ÷ 60	0.15 ÷ 0.2	5 ÷ 10
Харьков	80 ÷ 100	60	0.4	20 ÷ 25	60 ÷ 70	30 ÷ 60	0.2	10 ÷ 15
Athens	60	45 ÷ 60	0.4 ÷ 0.6	10 ÷ 15	60	40 ÷ 60	0.15 ÷ 0.2	5 ÷ 10

и высоты  $h_p$  с периодами 30 ÷ 60 мин. Большим фазам затмения не обязательно соответствовали большие возмущения концентрации электронов. При одинаковых значениях фазы возмущения  $N$  могли быть не одинаковыми. Это относится к данным ионозондов Dourbes и Juliusruh. Падение  $N$  по данным ионозонда Tromsø оказалось намного меньшим, чем ожидалось при почти полном затмении. Это объясняется географическим месторасположением ионозонда, который находится на широте 69° с. ш. Известно, что высокоширотная ионосфера существенно отличается от среднеширотной, она является менее стабильной, сильнее подвержена возмущениям естественного происхождения, особенно во время геокосмических бурь, что и наблюдалось в течение данной измерительной кампании. Уменьшение концентрации электронов, вызванное СЗ, в значительной мере компенсировалось ее увеличением, скорее всего, в результате движения плазмы вниз, точнее, потоков плазмы из плазмосферы, и выпадения энергичных электронов из магнитосферы. Последний процесс в высоких широтах, как правило, сопутствует геокосмическим бурям (см., например, [58, 59]).

Главная особенность СЗ 20 марта 2015 г. заключалась в том, что затмение имело место на фоне релаксирующей геокосмической бури, сопровождавшейся отрицательной ионосферной бурей. Буря существенно повлияла на медленные вариации параметров ионосферы. В тоже

время геокосмическая буря, похоже, заметно не повлияла на квазипериодические возмущения концентрации электронов.

Следующая особенность наблюдений эффектов затмения 20 марта 2015 г. связана со сравнительно большими значениями относительного уменьшения концентрации электронов

$$\delta_{N_{\max}} = 1 - \frac{N_{\min}}{N_0}$$

по данным ионозонда San Vito. Так, при практически одинаковых значениях функции покрытия  $A_{\max}$  (0.44 и 0.45) значения  $\delta_{N_{\max}}$  составляли 0.12 и 0.43 по данным ионозондов Харьков и San Vito соответственно. Такое различие обусловлено заметно отличающейся плотностью нисходящего потока плазмы, точнее его высотного градиента, для среднеширотного и более низкоширотного ионозондов, а также разной угловой высотой Солнца над горизонтом в момент максимальной фазы затмения, которая составляла около 45 и 50° для ионозондов San Vito и Харьков соответственно.

Для всех ионозондов значения  $N_{\min}/N_0$  и  $\delta_{N_{\max}}$  хорошо описывались линейным законом рекомбинации и следующими квазистационарными уравнениями непрерывности, справедливыми во время СЗ и в контрольные интервалы времени, т. е. в отсутствие затмения (индекс “0”):

$$q - \beta N + \Delta q = 0, \tag{1}$$

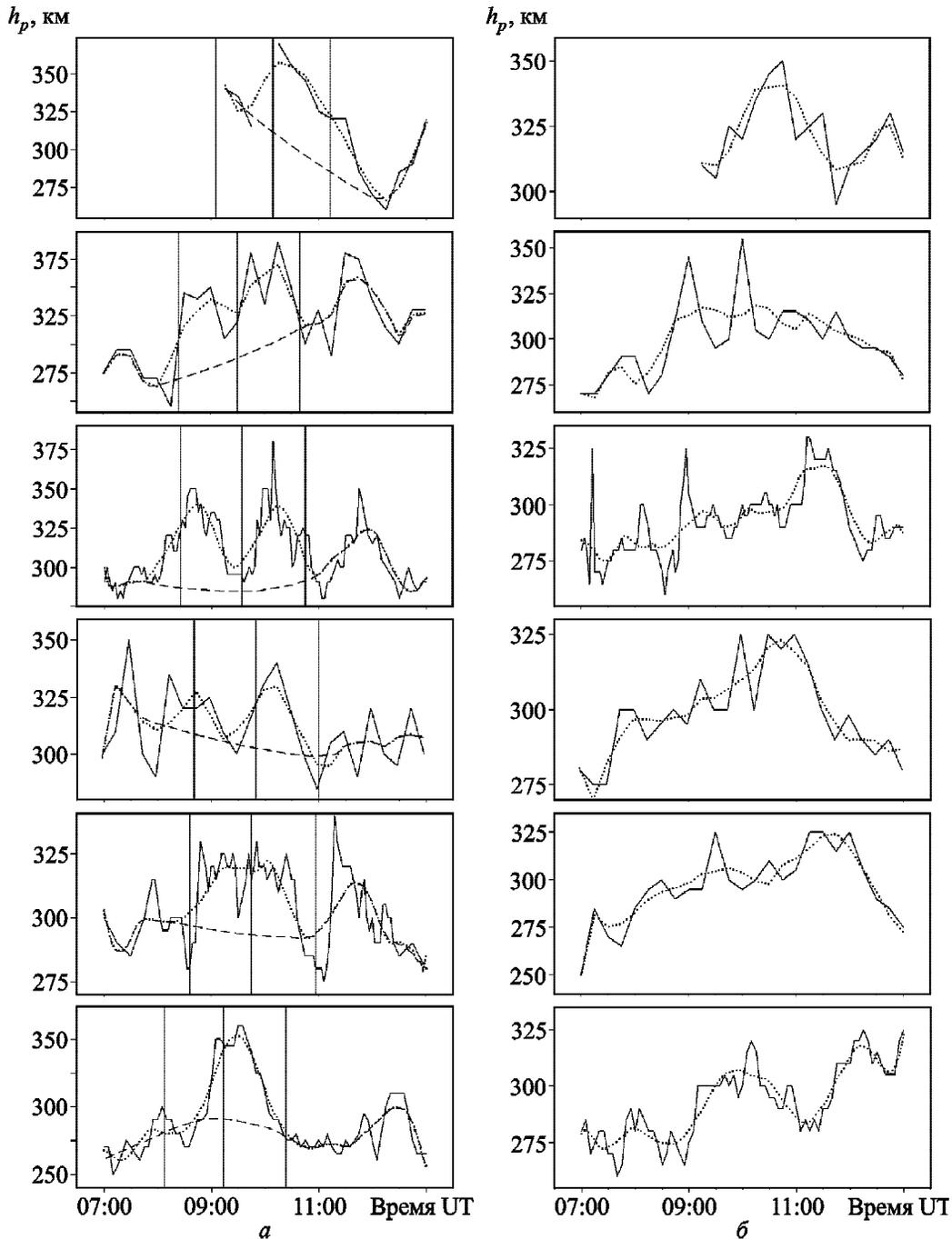


Рис. 5. Временные зависимости высоты  $h_p$  (сплошная линия) и сглаженной скользящим средним высоты  $\bar{h}_p$  (пунктирная линия) для ионозондов (панели сверху вниз) Tromsø, Fairford, Dourbes, Juliusruh, Pruhonice, Rocuetes: *a* – 20 марта 2015 г., *б* – 21 марта 2015 г. Штриховая линия описывает ожидаемые вариации  $h_p(t)$  в отсутствие СЗ

$$q_0 - \beta_0 N_0 + \Delta q_0 = 0, \quad (2)$$

где  $q$  и  $q_0$  – скорости ионизации,  $\beta$  и  $\beta_0$  – коэффициенты линейной рекомбинации,  $\Delta q$  и  $\Delta q_0$  – градиенты плотности потока плазмы, вызванные ее нисходящим движением. Величина этих источ-

ников зависела от географического положения ионозонда. Для  $\Delta q$  имеем [58, 59]

$$\Delta q = -\text{div} N \vec{v} \approx -\frac{d}{dz} N v_z.$$

По нашим оценкам, для большинства ионозондов  $\Delta q \approx 2 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ , для высокоширотного ионо-

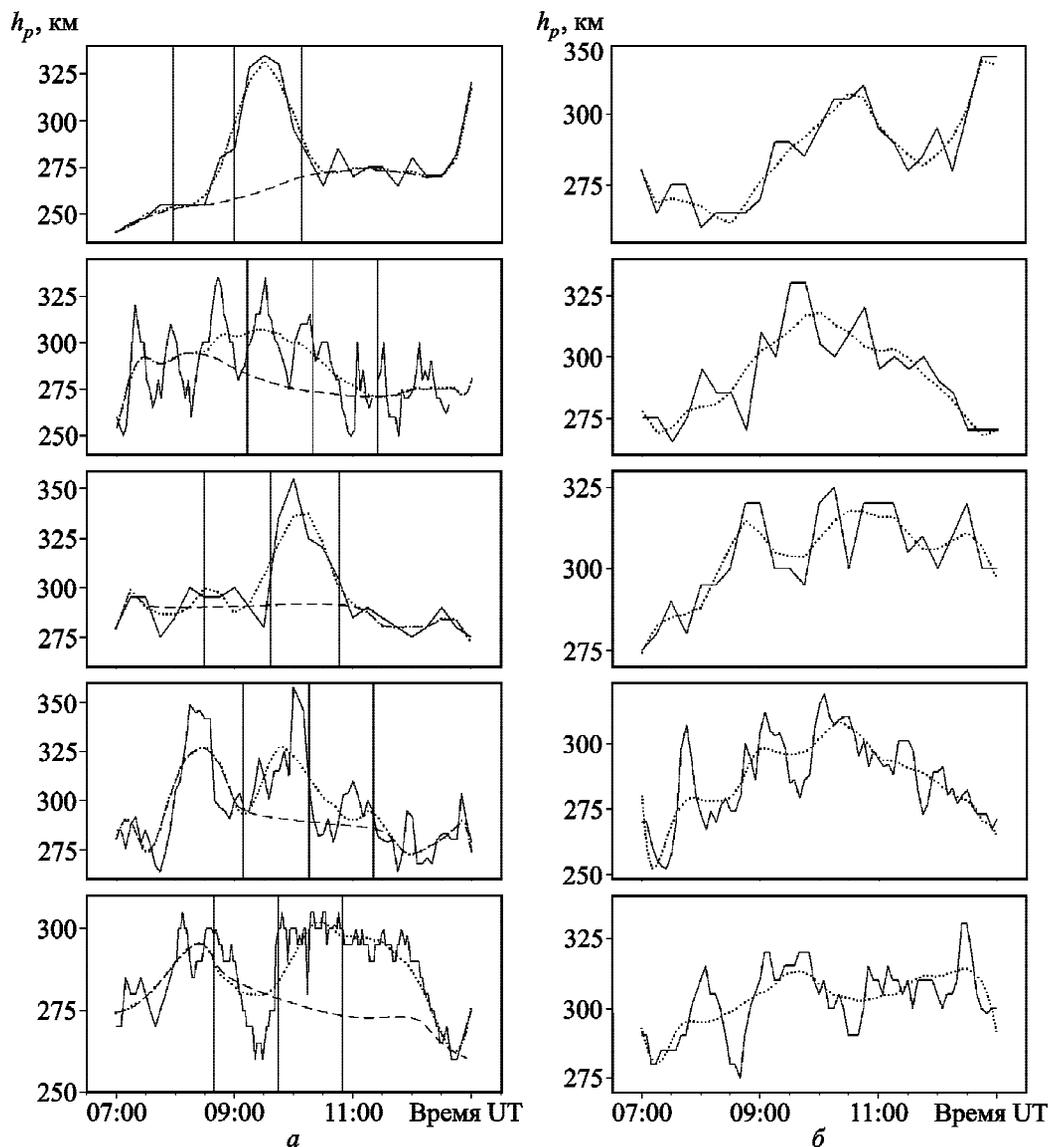


Рис. 6. Временные зависимости высоты  $h_p$  (сплошная линия) и сглаженной скользящим средним высоты  $\bar{h}_p$  (пунктирная линия) для ионозондов (панели сверху вниз) El Arinosillo, Москва, San Vito, Харьков, Athens: а – 20 марта 2015 г., б – 21 марта 2015 г. Штриховая линия описывает ожидаемые вариации  $h_p(t)$  в отсутствие СЗ

зонда Tromsø  $\Delta q \approx 10 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ , а для низкоширотных ионозондов El Arinosillo, San Vito и Athens  $\Delta q \approx \Delta q_0 \approx 0.5 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Из соотношений (1) и (2) следует, что

$$\frac{N_{\min}}{N_0} = \frac{\beta_0 q_{\min} + \Delta q}{\beta q_0 + \Delta q_0} = \frac{\beta_0 q_0 (1 - A_{\max}) + \Delta q}{\beta q_0 + \Delta q_0}. \quad (3)$$

Здесь  $q_0 = \beta_0 N_0 - \Delta q_0$ . Вблизи максимума ионизации, где  $N_0 \approx (5 \div 8) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ ,  $\beta_0 \approx 10^{-3} \text{ с}^{-1}$  имеем  $\beta_0 N_0 \approx (5 \div 8) \cdot 10^8 \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ .

При слабых потоках  $\Delta q, \Delta q_0 \rightarrow 0$  из соотношения (3) получим

$$\frac{N_{\min}}{N_0} = \frac{\beta_0}{\beta} (1 - A_{\max}). \quad (4)$$

В общем случае  $\beta \neq \beta_0$ , поскольку при уменьшении  $N$  в результате СЗ область отражения зондирующей радиоволны сдвигается вверх, где роль рекомбинации меньше. Именно это обстоятельство препятствует значительному уменьшению  $N$  при полном или почти полном затмении.

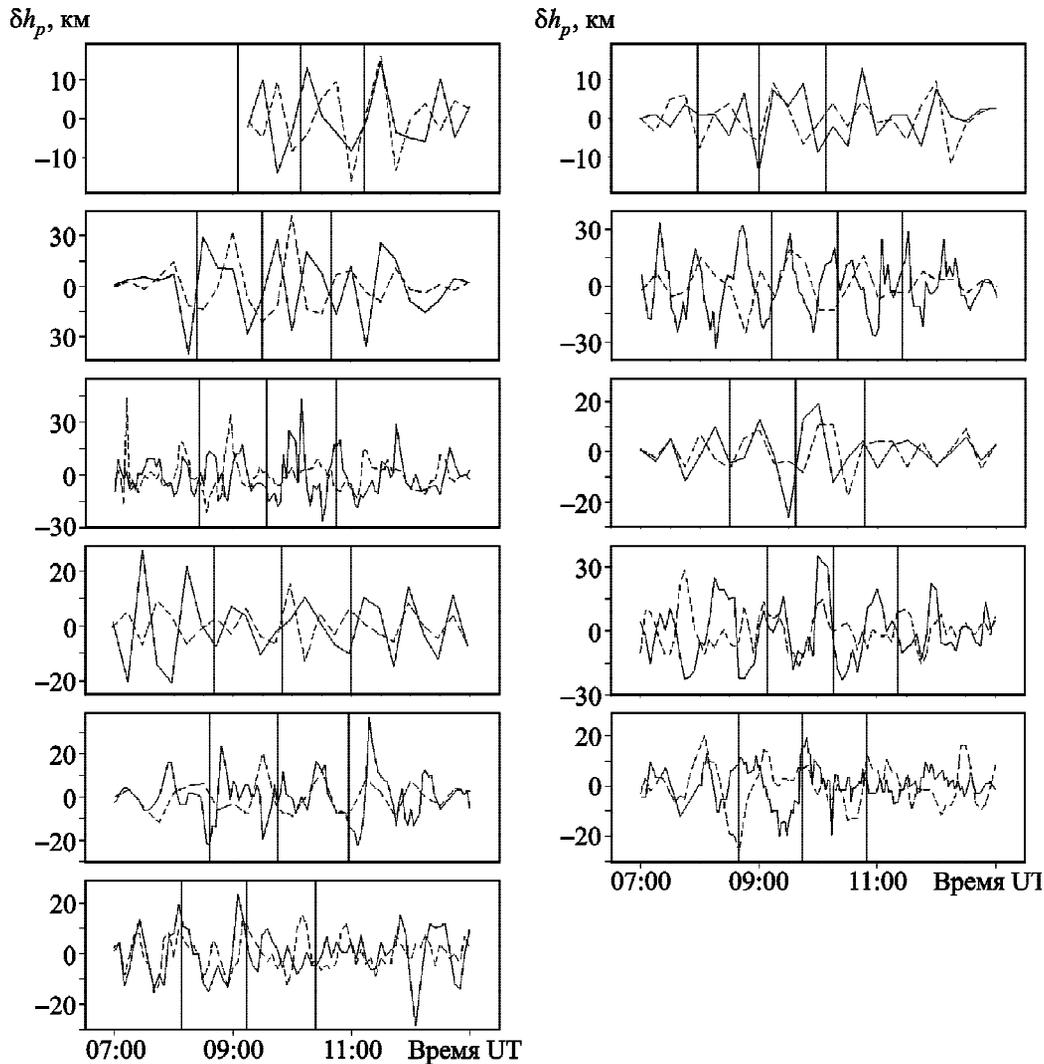


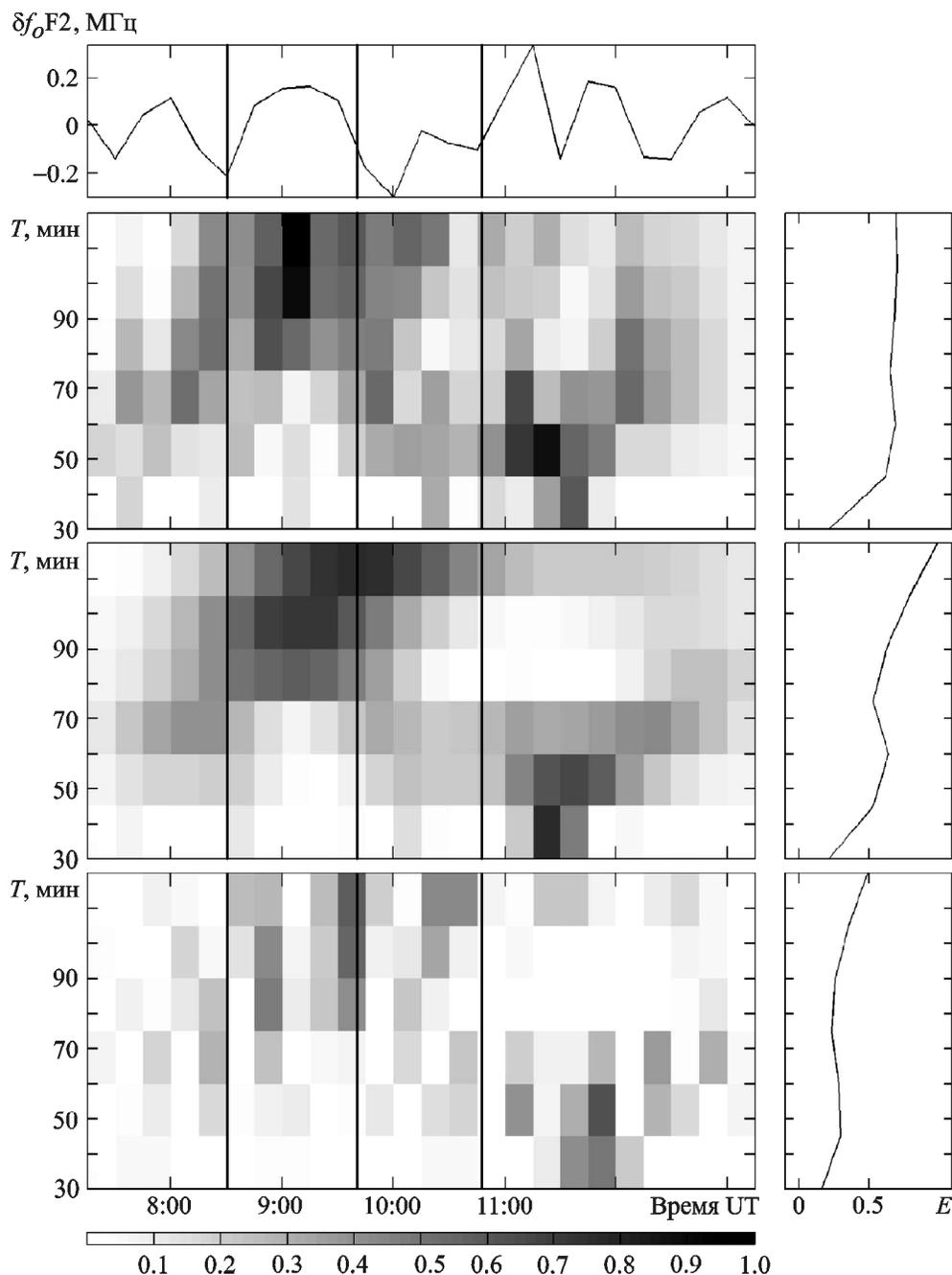
Рис. 7. Временные зависимости приращений высоты  $\delta h_p$  20 марта 2015 г. (сплошная линия) и 21 марта 2015 г. (штриховая линия) для ионозондов Tromsø, Fairford, Dourbes, Juliusruh, Pruhonice, Rocuetes (левая панель) и El Arinosillo, Москва, San Vito, Харьков, Athens (правая панель)

Зависимость  $\beta$  от высоты дается следующим соотношением (см., например, [58, 59]):

$$\beta(z) = \beta_0 \exp\left(-\int_{z_0}^z \frac{dz}{H(z)}\right),$$

где  $z_0$  – высота отражения радиоволны в отсутствие СЗ,  $H$  – приведенная высота нейтральной атмосферы. В слое F2  $H \approx 50$  км. На высоте 300 км  $\beta_0 \approx 10^{-3} \text{ с}^{-1}$  [58, 59]. При сдвиге области отражения на 50 км  $\beta$  уменьшается примерно в 2.7 раза. При этом, в соответствии с выражением (4) во столько же раз увеличивается отношение  $N_{\min}/N_0$ .

Результаты расчета  $\beta_0/\beta$  по формуле (4) приведены в табл. 2. Видно, что для самых низкоширотных ионозондов El Arinosillo, San Vito и Athens отношение  $\beta_0/\beta \approx 1$ . Для более высокоширотных ионозондов  $\beta_0/\beta > 1$ . Для ионозонда Tromsø это отношение составляет 15.4. На самом деле для высокоширотных ионозондов вместо соотношения (4) необходимо использовать уравнение (3), которое учитывает нисходящий поток плазмы. При  $q_0 + \Delta q_0 \approx 6 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $\Delta q \approx 10 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$  имеем  $\beta_0/\beta \approx 9.2$ , а значение сдвига области отражения составляет около 100 км. Приведенные оценки представляются близкими к истине.

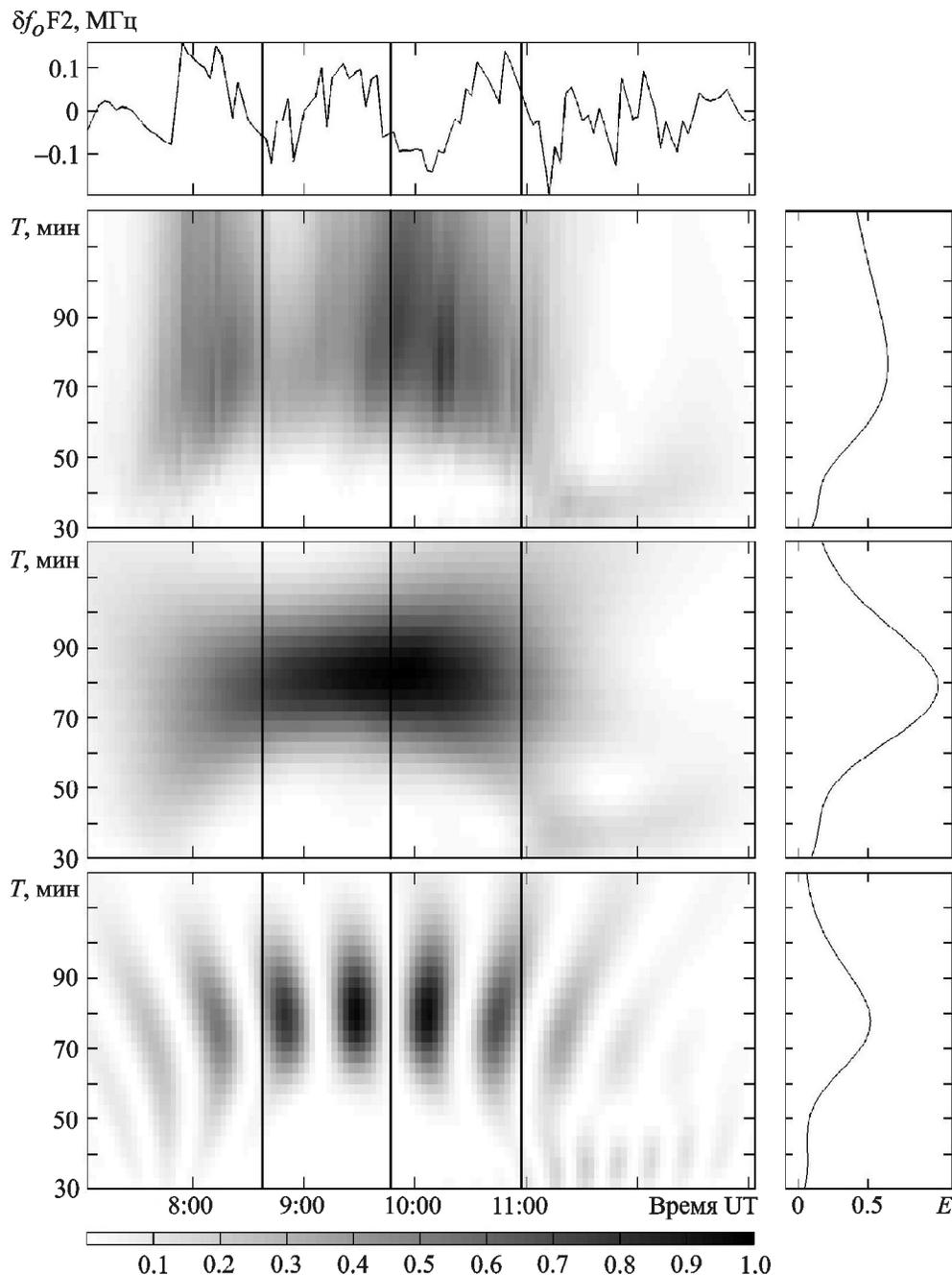


**Рис. 8.** Результаты системного спектрального анализа приращений  $\delta f_oF2$  по данным ионозонда San Vito 20 марта 2015 г. Панели сверху вниз: временная зависимость  $\delta f_oF2(t)$ , спектрограмма ОПФ; спектрограмма АПФ и спектрограмма ВП. Справа показаны энергограммы соответствующих спектрограмм

Время запаздывания момента наступления значения  $N_{\min}$  по отношению к моменту наступления  $A_{\max}$  равняется  $\Delta t = \beta^{-1}$ . Для типичной модели атмосферы на высотах 250, 290 и 330 км значение  $\beta$  составляет около  $2.7 \cdot 10^{-3}$ ,  $1.2 \cdot 10^{-3}$  и  $5.5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$  соответственно. При этом  $\Delta t$  равно около 6, 14 и 30 мин. Пример-

но такие значения и имели место в наблюдениях (см. табл. 2).

Результаты вычислений  $N_{\min}/N_0$  по формуле (3) также приведены в табл. 2. Таким образом, проведенные исследования подтвердили вывод работы [1] о том, что процессы при каждом СЗ, кроме общих закономерностей, имеют свои ин-



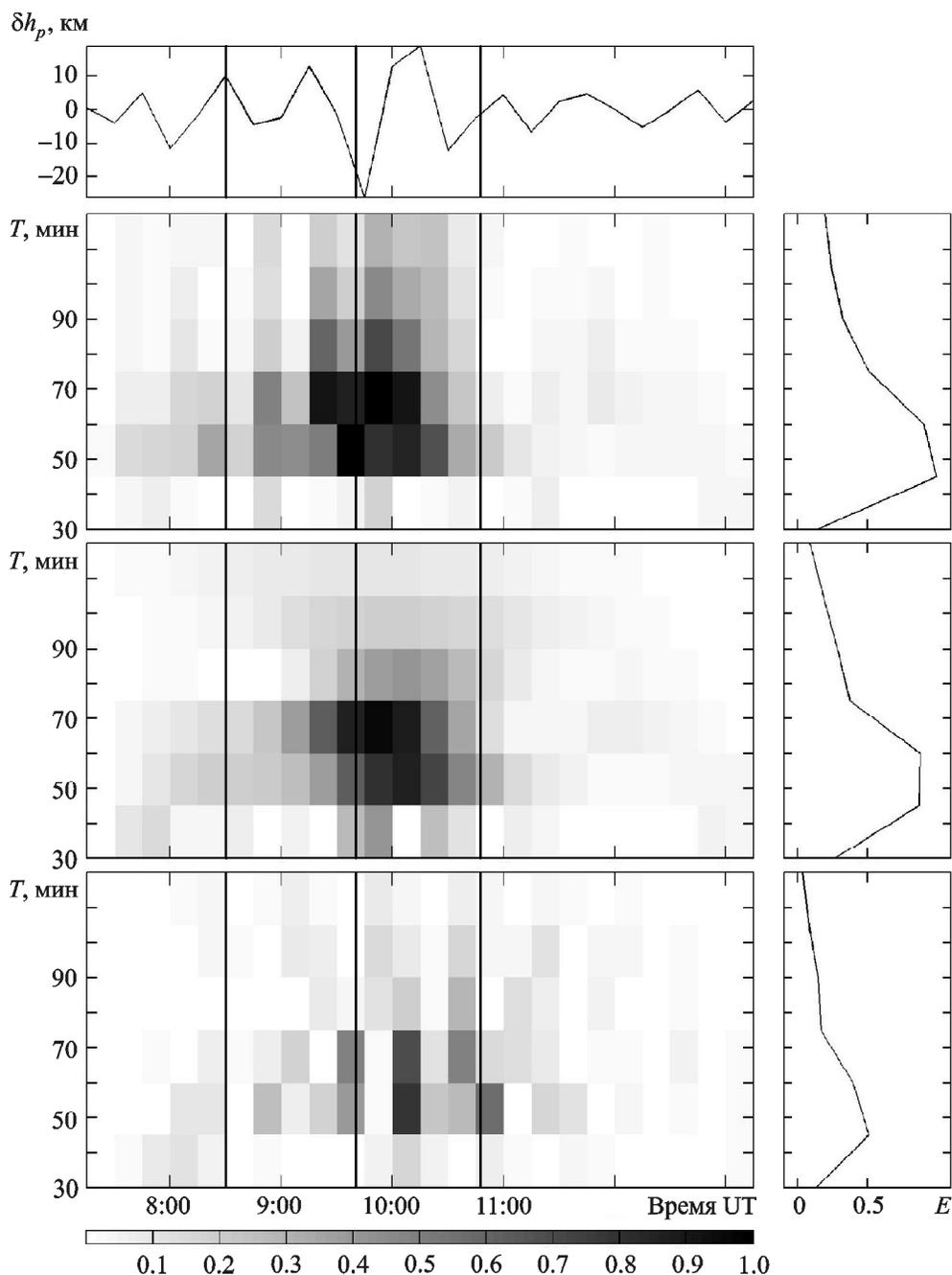
**Рис. 9.** Результаты системного спектрального анализа приращений  $\delta f_oF2$  по данным ионозонда Pruhonice 20 марта 2015 г. Панели сверху вниз: временная зависимость  $\delta f_oF2(t)$ , спектрограмма ОПФ; спектрограмма АПФ и спектрограмма ВП. Справа показаны энергограммы соответствующих спектрограмм

дивидуальные особенности, зависящие от состояния космической погоды, сезона, времени суток, географических координат и т. п.

## 7. Выводы

1. Частное СЗ над Европой с фазой  $0.55 \div 0.95$  привело к значительному возмущению F-области

ионосферы. Критическая частота  $f_oF2$  уменьшалась на  $1 \div 2$  МГц, или на  $5 \div 25$  %. Продолжительность возмущения достигала  $2.5 \div 3$  ч. Минимальные значения  $f_oF2$  запаздывали по отношению к моменту времени наступления главной фазы затмения на  $5 \div 30$  мин. Уменьшение концентрации электронов достигало  $23 \div 51$  %.



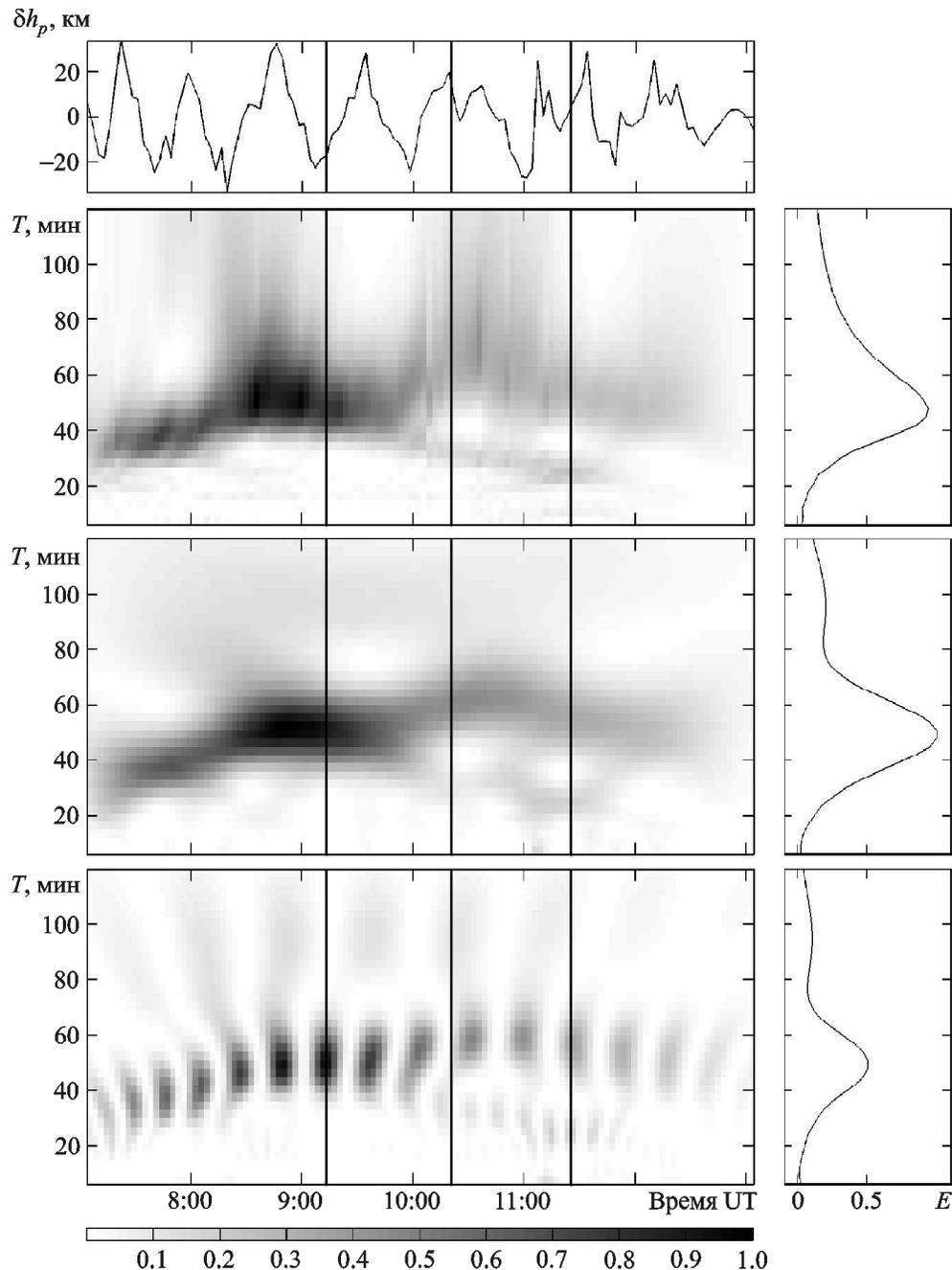
**Рис. 10.** Результаты системного спектрального анализа приращений  $\delta h_p$  по данным ионозонда San Vito 20 марта 2015 г. Панели сверху вниз: временная зависимость  $\delta h_p$ , спектрограмма ОПФ, спектрограмма АПФ и спектрограмма ВП. Справа показаны энергограммы соответствующих спектрограмм

2. СЗ привело к увеличению высоты  $h_p$  на  $10 \div 70$  км, или  $3 \div 20$  %. Продолжительность эффекта составляла  $1.5 \div 2$  ч. Максимальные значения  $h_p$  наблюдались примерно через  $20 \div 30$  мин после наступления максимальной фазы затмения.

3. СЗ сопровождалось волновыми возмущениями с периодом  $30 \div 100$  мин. Кроме того, вблизи главной фазы затмения наблюдался сбой

фазы колебания. В день затмения период волновых возмущений несколько отличался от периода в контрольный день. Амплитуда волновых возмущений на большинстве ионосферных станций в день затмения была примерно в  $2 \div 3$  раза больше, чем в контрольный день.

4. Ионосферная буря существенно повлияла на величину эффектов, вызванных СЗ.



**Рис. 11.** Результаты системного спектрального анализа приращений  $\delta h_p$  по данным ионозонда Москва 20 марта 2015 г. Панели сверху вниз: временная зависимость  $\delta h_p$ , спектрограмма ОПФ, спектрограмма АПФ и спектрограмма ВП. Справа показаны энергограммы соответствующих спектрограмм

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черногор Л. Ф. Физические эффекты солнечных затмений в атмосфере и геокосмосе: Монография. – Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2013. – 480 с.
2. Eccles W. H. Effect of the eclipse on wireless telegraphic signals // Electrician. – 1912. – Vol. 69. – P. 109–117.
3. Mimno H. R. and Wang P. H. Continuous Kennelley-Heavyside layer records of a solar eclipse (with suggestions of a corpuscular effect on Appleton layer) // Proc. Inst. Radio Eng. – 1933. – Vol. 21. – P. 529–545.
4. Васильев К. Н., Велешин А. С., Косенков А. Р. Ионосферный эффект солнечного затмения 15 февраля 1961 г. по наблюдениям в Москве // Геомагнетизм и аэрномия. – 1961. – Т. 1, № 2. – С. 277–278.
5. Данилкин Н. П., Коченова Н. А., Свечников А. М. Состояние ионосферы над Ростовом-на-Дону в период солнечного затмения 15 февраля 1961 г. //

- Геомагнетизм и аэрномия. – 1961. – Т. 1, № 4. – С. 612–615.
6. Шати́ро Б. С., Шашу́нькина В. М. Движения в области F ионосферы над Тбилиси в период затмения 15.02.1961 г. // Геомагнетизм и аэрномия. – 1961. – Т. 1, № 5. – С. 760–765.
  7. Шашу́нькина В. М., Турбин Р. И. Предварительные результаты наблюдений ионосферного эффекта солнечного затмения 15.11.1961 г. // Геомагнетизм и аэрномия. – 1961. – Т. 1, № 5. – С. 835–838.
  8. Суханова Р. Д. Ионосферный эффект солнечного затмения 15.02.1961 г. по наблюдениям в Солехарде // Геомагнетизм и аэрномия. – 1961. – Т. 1, № 6. – С. 1066–1067.
  9. Гришкевич Л. В., Васин В. А. Об эффектах в ионосфере, наблюдавшихся в периоды солнечных затмений 02.12.1956 г. и 15.02.1961 г. в Горьком // Геомагнетизм и аэрномия. – 1961. – Т. 1, № 6. – С. 949–954.
  10. Klobuchar J. A. and Whitney H. E. Ionospheric electron content measurements during a solar eclipse // J. Geophys. Res. – 1965. – Vol. 70, Is. 5. – P. 1254–1257. DOI: 10.1029/JZ070i005p01254
  11. Hunter A. N., Holman B. K., Fieldgate D. G., and Kelleher R. Faraday rotation studies in Africa during the solar eclipse of June 30, 1973 // Nature. – 1974. – Vol. 250, Is. 5463 – P. 205–206. DOI: 10.1038/250205a0
  12. Cohen E. A. The study of the effect of solar eclipses on the ionosphere based on satellite beacon observations // Radio Sci. – 1984. – Vol. 19, Is. 3. – P. 769–777. DOI: 10.1029/RS019i003p00769
  13. Afraimovich E. L., Palamartchouk K. S., Perevalova N. P., Chetukhov V. V., Lukhnev A. V., and Zalutsky V. T. Ionospheric effects of the solar eclipse of March 9, 1997, as deduced from GPS data // Geophys. Res. Lett. – 1998. – Vol. 25, No. 4. – P. 465–468. DOI: 10.1029/98GL00186
  14. Афра́ймович Э. Л., Вое́йков С. В., Перева́лова Н. П., Водя́нников В. В., Горди́енко Г. И., Литви́нов Ю. Г., Яковец А. Ф. Ионосферные эффекты солнечного затмения 29 марта 2006 г. над Казахстаном // Геомагнетизм и аэрномия. – 2007. – Т. 47, № 4. – С. 491–500.
  15. Evans J. V. An F region eclipse // J. Geophys. Res. – 1965. – Vol. 70, Is. 1. – P. 131–142. DOI: 10.1029/JZ070i001p00131
  16. Salah J. E., Oliver W. L., Foster J. C., Holt J. M., Emery B. A., and Roble R. G. Observations of the May 30, 1984, annular solar eclipse at Millstone Hill // J. Geophys. Res. – 1986. – Vol. 91, Is. A2. – P. 1651–1660. DOI: 10.1029/JA091iA02p01651
  17. Акимов Л. А., Григоренко Е. И., Таран В. И., Тырнов О. Ф., Черногор Л. Ф. Комплексные радиофизические и оптические исследования динамических процессов в атмосфере и геосмосе, вызванных солнечным затмением 11 августа 1999 года // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 2002. – № 2. – С. 25–63.
  18. Акимов Л. А., Григоренко Е. И., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Особенности атмосферно-ионосферных эффектов солнечного затмения 31 мая 2003 года: результаты оптических и радиофизических наблюдений в Харькове // Успехи современной радиоэлектроники. – 2005. – № 3. – С. 55–70.
  19. Akimov L. A., Bogovskii V. K., Grigorenko E. I., Taran V. I., and Chernogor L. F. Atmospheric–ionospheric effects of the solar eclipse of May 31, 2003, in Kharkov // Geomagnetism and Aeronomy. – 2005. – Vol. 45, No. 4. – P. 494–518.
  20. Бурмака В. П., Лысенко В. Н., Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Атмосферно-ионосферные эффекты частного солнечного затмения 3 октября 2005 г. в Харькове. 1. Результаты наблюдений // Космічна наука і технологія. – 2007. – Т. 13, № 6. – С. 74–86.
  21. Grigorenko E. I., Lyashenko M. V., and Chernogor L. F. Effects of solar eclipse of March 29, 2006, in the ionosphere and atmosphere // Geomagnetism and Aeronomy. – 2008. – Vol. 48, No. 3. – P. 337–351.
  22. Домнин И. Ф., Емельянов Л. Я., Черногор Л. Ф. Динамика ионосферной плазмы над Харьковом во время солнечного затмения 4 января 2011 г. // Радиофизика и радиоастрономия. – 2012. – Т. 17, № 2. – С. 132–145.
  23. Domnin I. F., Yemel'yanov L. Ya., Kotov D. V., Lyashenko M. V., and Chernogor L. F. Solar Eclipse of August 1, 2008, above Kharkov: 1. Results of Incoherent Scatter Observations // Geomagnetism and Aeronomy. – 2013. – Vol. 53, No. 1. – P. 113–123.
  24. Burmaka V. P. and Chernogor L. F. Solar Eclipse of August 1, 2008, above Kharkov: 2. Observation Results of Wave Disturbances in the Ionosphere // Geomagnetism and Aeronomy. – 2013. – Vol. 53, No. 4. – P. 479–491.
  25. Lyashenko M. V. and Chernogor L. F. Solar eclipse of August 1, 2008, over Kharkov: 3. Calculation Results and discussion // Geomagnetism and Aeronomy. – 2013. – Vol. 53, No. 3. – P. 367–376.
  26. Domnin I. F., Emelyanov L. Y., Lyashenko M. V., and Chernogor L. F. Partial solar eclipse of January 4, 2011 above Kharkiv: Observation and simulations results // Geomagnetism and Aeronomy. – 2014. – Vol. 54, No. 5. – P. 583–592.
  27. Bertin F., Hughes K. A., and Kersley L. Atmospheric waves induced by the solar eclipse of 30 June 1973 // J. Atmos. Terr. Phys. – 1977. – Vol. 39, Is. 4. – P. 457–461. DOI: 10.1016/0021-9169(77)90153-2
  28. Sen Gurta A., Goel G. K., and Mathur B. S. Effect of the 16 February 1980 solar eclipse on VLF propagation // J. Atmos. Terr. Phys. – 1980. – Vol. 42, Is. 11/12. – P. 907–909. DOI: 10.1016/0021-9169(80)90107-5
  29. Cheng K., Huang Y.-N., and Chen S.-W. Ionospheric effects of the solar eclipse of September 23, 1987, around the equatorial anomaly crest region // J. Geophys. Res. – 1992. – Vol. 97, Is. A1. – P. 103–111. DOI: 10.1029/91JA02409
  30. Huang C. R., Liu C. H., Yeh K. C., Lin K. H., Tsai W. H., Yeh H. C., and Liu J. Y. A study of tomographically reconstructed ionospheric images during a solar eclipse // J. Geophys. Res. – 1999. – Vol. 104, Is. A1. – P. 79–94. DOI: 10.1029/98JA02531
  31. Борисов Б. Б., Егоров Д. А., Егоров Н. Е., Колесник А. Г., Колесник С. А., Мельчинов В. П., Нагорский П. М., Парфенов С. С., Решетников Д. Д., Смирнов В. Ф., Степанов А. Е., Таращук Ю. Е., Тельпуховский Е. Д., Цыби́ков Б. Б., Шинкевич Б. М. Комплексное экспериментальное исследование реакции ионосферы на солнечное затмение 9 марта 1997 г. // Геомагнетизм и аэрномия. – 2000. – Т. 40, № 3. – С. 94–103.

32. Урядов В. П., Леонов А. М., Понятов А. А. О вариациях характеристик КВ сигнала на трассе наклонного зондирования во время солнечного затмения 11 августа 1999 г. // Изв. вузов. Радиофизика. – 2000. – Т. 43, № 8. – С. 682–686.
33. Гоков А. М., Черногор Л. Ф. Результаты наблюдения процессов в нижней ионосфере, сопутствующих затмению Солнца 11 августа 1999 г. // Радиофизика и радиоастрономия. – 2000. – Т. 5, № 4. – С. 348–360.
34. Farges T., Jodogne J. C., Bamford R., Roux Y. Le., Gauthier F., Vila P. M., Altadill D., Sole J. G., and Miro G. Disturbances of the western European ionosphere during the total solar eclipse of 11 August 1999 measured by a wide ionosonde and radar network // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. – 2001. – Vol. 63, No. 9. – P. 915–924. DOI: 10.1016/S1364-6826(00)00195-4
35. Cheng K., Huang Y.-N., and Chen S.-W. Ionospheric effects of the solar eclipse of September 23, 1987, around the equatorial anomaly crest region // J. Geophys. Res. – 1992. – Vol. 97, Is. A1. – P. 103–111. DOI: 10.1029/91JA02409
36. Tomás A. T., Lühr H., Förster M., Rentz S., and Rother M. Observations of the low-latitude solar eclipse on 8 April 2005 by CHAMP // J. Geophys. Res. – 2007. – Vol. 112, Is. A6. – id. A06303. DOI: 10.1029/2006JA012168
37. Founda D., Melas D., Lykoudis S., Lisaridis I., Gerasopoulos E., Kouvarakis G., Petrakis M., and Zerefos C. The effect of the total solar eclipse of 29 March 2006 on meteorological variables in Greece // Atmos. Chem. Phys. – 2007. – Vol. 7, Is. 21. – P. 5543–5553. DOI: 10.5194/acp-7-5543-2007
38. Le H., Liu L., Yue X., and Wan W. The ionospheric responses to the 11 August 1999 solar eclipse: observations and modeling // Ann. Geophys. – 2008. – Vol. 26, Is. 1. – P. 107–116. DOI: 10.5194/angeo-26-107-2008
39. Jakowski N., Stankov S. M., Wilken V., Borries C., Altadill D., Chum J., Buresova D., Boska J., Sauli P., Hruska F., and Cander Lj. R. Ionospheric behavior over Europe during the solar eclipse of 3 October 2005 // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. – 2008. – Vol. 70, No. 6. – P. 836–853. DOI: 10.1016/j.jastp.2007.02.016
40. Le H., Liu L., Yue X., Wan W., and Ning B. Latitudinal dependence of the ionospheric response to solar eclipse // J. Geophys. Res. – 2009. – Vol. 114, Is. A7. – id. A07308. DOI: 10.1029/2009JA014072.
41. Кащеев С. Б., Зализовский А. В., Колосков А. В., Галушко В. Г., Пикун И. И., Ямпольский Ю. М., Куркин В. И., Литовкин Г. И., Орлов А. И. Вариации частоты КВ сигналов на протяженных трассах во время солнечного затмения // Радиофизика и Радиоастрономия. – 2009. – Т. 14, № 4. – С. 353–366.
42. Adeniyi J. O., Radicella S. M., Adimula I. A., Willoughby A. A., Oladipo O. A., and Olawepo O. Signature of the 29 March 2006 eclipse on the ionosphere over an equatorial station // J. Geophys. Res. – 2007. – Vol. 112, Is. A6. – id. A06314. DOI: 10.1029/2006JA012197
43. Chernogor L. F. Wave response of the ionosphere to the partial solar eclipse of August 1, 2008 // Geomagnetism and Aeronomy. – 2010. – Vol. 50, No. 3. – P. 346–361.
44. Akimov A. L. and Chernogor L. F. Effects of the solar eclipse of August 1, 2008 on the Earth's lower atmosphere // Kimematics and Physics of Celestial Bodies. – 2010. – Vol. 26, No. 3. – P. 135–145.
45. Chernogor L. F. Variations in the amplitude and phase of VLF radio waves in the ionosphere during the August 1, 2008, solar eclipse // Geomagnetism and Aeronomy. – 2010. – Vol. 50, No. 1. – P. 100–110.
46. Chen G., Zhao Z., Yang G., Zhou C., Yao M., Li T., Huang S., and Li N. Enhancement and HF Doppler observations of sporadic-E during the solar eclipse of 22 July 2009 // J. Geophys. Res. – 2010. – Vol. 115, Is. A9. – id. A09325. DOI: 10.1029/2010JA015530.
47. Черногор Л. Ф., Барабаи В. В. Отклик средней ионосферы на солнечное затмение 4 января 2011 г. в Харькове: Результаты вертикального зондирования // Космічна наука і технологія. – 2011. – Т. 17, № 4. – С. 41–52.
48. Garmash K. P., Leus S. G., and Chernogor L. F. Radiophysical effects of the January 4, 2011 solar eclipse as observed in the parameters of obliquely propagating HF signals // Radio Physics and Radio Astronomy. – 2011. – Vol. 2, Is. 4. – P. 325–337. DOI: 10.1615/RadioPhysicsRadioAstronomy.v2.i4.50
49. Chernogor L. F. Dynamic processes in the near-ground atmosphere during the solar eclipse of August 1, 2008 // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. – 2011. – Vol. 47, No. 1. – P. 77–86.
50. Chernogor L. F., Grigorenko Ye. I., and Lyashenko M. V. Effects in geospace during partial solar eclipses over Kharkiv // Int. J. Remote Sens. – 2011. – Vol. 32, No. 11. – P. 3219–3229. DOI: 10.1080/01431161.2010.541509
51. Chernogor L. F. Effects of solar eclipses in the ionosphere: Doppler sounding results: 1. Experimental data // Geomagnetism and Aeronomy. – 2012. – Vol. 52, No. 6. – P. 768–778.
52. Chernogor L. F. Effects of solar eclipses in the ionosphere: Doppler sounding results: 2. Spectral analysis // Geomagnetism and Aeronomy. – 2012. – Vol. 52, No. 6. – P. 779–792.
53. Chen G., Zhao Z., Ning B., Deng Z., Yang G., Zhou C., Yao M., Li S., and Li N. Latitudinal dependence of the ionospheric response to solar eclipse of 15 January 2010 // J. Geophys. Res. – 2011. – Vol. 116, Is. A6. – id. A06301. DOI: 10.1029/2010JA016305
54. Chernogor L. F. Physical processes in the middle ionosphere accompanying the solar eclipse of January 4, 2011, in Kharkov // Geomagnetism and Aeronomy. – 2013. – Vol. 53, No. 1. – P. 19–31.
55. Беликович В. В., Вяхирев В. Д., Калинина Е. Е., Терещенко В. Д., Черняев С. М., Терещенко В. А. Отклик ионосферы на частное солнечное затмение 29 марта 2006 г. по наблюдениям в Нижнем Новгороде и Мурманске // Геомагнетизм и аэрономия. – 2007. – Т. 48, № 1. – С. 103–108.
56. Ковалев А. А., Колесник А. Г., Колесник С. А. Ионосферные эффекты солнечных затмений на средних широтах // Геомагнетизм и аэрономия. – 2009. – Т. 49, № 4. – С. 500–506.
57. Chernogor L. F. Advanced methods of spectral analysis of quasiperiodic wave-like processes in the ionosphere: specific features and experimental results // Geomagnetism and Aeronomy. – 2008. – Vol. 48, No. 5. – P. 652–673.

58. Schunk R. W. and Nagy A. Ionospheres: physics, plasma physics, and chemistry. – Cambridge: Cambridge University Press, 2000. – 554 p.
59. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. – М.: Наука, 1987. – 528 с.

## REFERENCES

1. CHERNOGOR, L. F., 2013. *Physical effects of solar eclipses in atmosphere and geospace: Monograph*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ. (in Russian).
2. ECCLES, W. H., 1912. Effect of the eclipse on wireless telegraphic signals. *Electrician*. vol. 69, pp. 109–117.
3. MIMNO, H. R. and WANG, P. H., 1933. Continuous Kennelley–Heaviside layer records of a solar eclipse (with suggestions of a corpuscular effect on Appleton layer). *Proc. Inst. Radio Eng.* vol. 21, pp. 529–545.
4. VASILIEV, K. N., VELESHIN, A. S. and KOSENKOV, A. R., 1961. Ionospheric effects of the solar eclipse of February 15, 1961, according to the Moscow observations. *Geomagnetizm i aeronomiya*. vol. 1, no. 2, pp. 277–278 (in Russian).
5. DANILKIN, N. P., KOCHENOVA, N. A. and SVECHNIKOV, A. M., 1961. State of the ionosphere over Rostov-on-Don during the solar eclipse of February 15, 1961. *Geomagnetizm i aeronomiya*. vol. 1, no. 4, pp. 612–615 (in Russian).
6. SHAPIRO, B. S. and SHASHUNKINA, V. M., 1961. Movement in the F region of the ionosphere over Tbilisi during the eclipse of February 15, 1961. *Geomagnetizm i aeronomiya*. vol. 1, no. 5, pp. 760–765 (in Russian).
7. SHASHUNKINA, V. M. and TURBIN, R. I., 1961. Preliminary observations of ionospheric effects of solar eclipse of February 15, 1961. *Geomagnetizm i aeronomiya*. vol. 1, no. 5, pp. 835–838 (in Russian).
8. SUKHANOVA, R. D., 1961. Ionospheric effects of the solar eclipse of February 15, 1961, on observations to the Salekhard. *Geomagnetizm i aeronomiya*. vol. 1, no. 6, pp. 1066–1067 (in Russian).
9. GRISHKEVICH, L. V. and VASIN, V. A., 1961. On the effects of the ionosphere observed during a solar eclipse of December 02, 1956, and December 02, 1961, in Gorky. *Geomagnetizm i aeronomiya*. vol. 1, no. 6. pp. 949–954 (in Russian).
10. KLOBUCHAR, J. A. and WHITNEY, H. E., 1965. Ionospheric electron content measurements during a solar Eclipse. *J. Geophys. Res.* vol. 70, no. 5, pp. 1254–1257. DOI: 10.1029/JZ070i005p01254
11. HUNTER, A. N., HOLMAN, B. K., FIELDGATE, D. G. and KELLEHER, R., 1974. Faraday rotation studies in Africa during the solar eclipse of June 30, 1973. *Nature*. vol. 250, is. 5463, pp. 205–206. DOI: 10.1038/250205a0
12. COHEN, E. A., 1984. The study of the effect of solar eclipses on the ionosphere based on satellite beacon observations. *Radio Sci.* vol. 19, is. 3, pp. 769–777. DOI: 10.1029/RS019i003p00769
13. AFRAIMOVICH, E. L., PALAMARTCHOUK, K. S., PEREVALOVA, N. P., CHEMUKHOV, V. V., LUKHNEV, A. V. and ZALUTSKY, V. T., 1998. Ionospheric effects of the solar eclipse of March 9, 1997, as deduced from GPS data. *Geophys. Res. Lett.* vol. 25, no. 4, pp. 465–468. DOI: 10.1029/98GL00186
14. AFRAIMOVICH, E. L., VOEYKOV, S. V., PEREVALOVA, N. P., VODYANNIKOV, V. V., GORDIENKO, G. I., LITVINOV, Yu. G. and YAKOVETS, A. F., 2007. Ionospheric effects of the solar eclipse of March 29, 2006, over Kazakhstan. *Geomagnetizm i aeronomiya*. vol. 47, no. 4, pp. 461–469 (in Russian).
15. EVANS, J. V., 1965. An F region eclipse. *J. Geophys. Res.* vol. 70, is. 1, pp. 131–142. DOI: 10.1029/JZ070i001p00131
16. SALAH, J. E., OLIVER, W. L., FOSTER, J. C., HOLT, J. M., EMERY B. A., and ROBLE R. G., 1986. Observations of the May 30, 1984, annular solar eclipse at Millstone Hill. *J. Geophys. Res.* vol. 91, is. A2, pp. 1651–1660. DOI: 10.1029/JA091iA02p01651
17. AKIMOV, L. A., GRIGORENKO, E. I., TARAN, V. I., TYRNOV, O. F. and CHERNOGOR, L. F., 2002. Integrated radio physical and optical studies of dynamic processes in the atmosphere and geospace caused by the solar eclipse of August 11, 1999. *Zarubezhnaya radioelektronika. Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*. no. 2, pp. 25–63 (in Russian).
18. AKIMOV, L. A., GRIGORENKO, E. I., TARAN, V. I. and CHERNOGOR, L. F., 2005. Features atmospheric-ionospheric effects of the solar eclipse of May 31, 2003: The results of the optical and radio physical observations in Kharkov. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*. no. 3, pp. 55–70 (in Russian).
19. AKIMOV, L. A., BOGOVSKII, V. K., GRIGORENKO, E. I., TARAN, V. I. and CHERNOGOR, L. F., 2005. Atmospheric-ionospheric effects of the solar eclipse of May 31, 2003, in Kharkov. *Geomagnetizm and Aeronomy*. vol. 45, no. 4, pp. 494–518.
20. BURMAKA, V. P., LYSENKO, V. N., LYASHENKO, M. V. and CHERNOGOR, L. F., 2007. Atmospheric and ionospheric effects of the partial solar eclipse of October 3, 2005, in Kharkiv. 1. The results of observation. *Kosmichna nauka i tekhnologiya*. vol. 13, no. 6, pp. 74–86 (in Russian).
21. GRIGORENKO, E. I., LYASHENKO, M. V. and CHERNOGOR, L. F., 2008. Effects of solar eclipse of March 29, 2006, in the ionosphere and atmosphere. *Geomagnetizm and Aeronomy*, vol. 48, no. 3, pp. 337–351.
22. DOMNIN, I. F., EMELYANOV, L. Ya. and CHERNOGOR, L. F., 2012. The dynamics of ionosphere plasma over Kharkiv during the solar eclipse of January 4, 2011. *Radiofizika i Radioastronomia*. vol. 17, no. 2, pp. 132–145 (in Russian).
23. DOMNIN, I. F., YEMEL'YANOV, L. Ya., KOTOV, D. V., LYASHENKO, M. V. and CHERNOGOR, L. F., 2013. Solar Eclipse of August 1, 2008, above Kharkiv: 1. Results of Incoherent Scatter Observations. *Geomagnetizm and Aeronomy*. vol. 53, no. 1, pp. 113–123.
24. BURMAKA, V. P. and CHERNOGOR, L. F., 2013. Solar Eclipse of August 1, 2008, above Kharkov: 2. Observation Results of Wave Disturbances in the Ionosphere. *Geomagnetizm and Aeronomy*. vol. 53, no. 4, pp. 479–491.

25. LYASHENKO, M. V. and CHERNOGOR, L. F., 2013. Solar eclipse of August 1, 2008, over Kharkiv: 3. Calculation Results and discussion. *Geomagnetism and Aeronomy*. vol. 53, no. 3, pp. 367–376.
26. DOMNIN, I. F., EMELYANOV, L. Y., LYASHENKO, M. V. and CHERNOGOR, L. F., 2014. Partial solar eclipse of January 4, 2011 above Kharkiv: Observation and simulations results. *Geomagnetism and Aeronomy*. vol. 54, no. 5, pp. 583–592.
27. BERTIN, F., HUGHES, K. A. and KERSLEY, L. Atmospheric waves induced by the solar eclipse of 30 June 1973. *J. Atmos. Terr. Phys.* vol. 39, is. 4, pp. 457–461. DOI: 10.1016/0021-9169(77)90153-2
28. SEN GURTA, A., GOEL, G. K. and MATHUR, B. S., 1980. Effect of the 16 February 1980 solar eclipse on VLF propagation. *J. Atmos. Terr. Phys.* vol. 42, is. 11/12, pp. 907–909. DOI: 10.1016/0021-9169(80)90107-5
29. CHENG, K., HUANG, Y.-N. and CHEN, S.-W., 1992. Ionospheric effects of the solar eclipse of September 23, 1987, around the equatorial anomaly crest region. *J. Geophys. Res.* vol. 97, is. A1, pp. 103–111. DOI: 10.1029/91JA02409
30. HUANG, C. R., LIU, C. H., YEH, K. C., LIN, K. H., TSAI, W. H., YEH, H. C. and LIU, J. Y., 1999. A study of tomographically reconstructed ionospheric images during a solar eclipse. *J. Geophys. Res.* vol. 104, no. A1, pp. 79–94. DOI: 10.1029/98JA02531
31. BORISOV, B. B., YEGOROV, D. A., YEGOROV, N. E., KOLESNIK, A. G., KOLESNIK, S. A., MELCHINOV, V. P., NAGORSKIY, P. M., PARFENOV, S. S., RESHETNIKOV, D. D., SMIRNOV, V. F., STEPANOV, A. E., TARASHCHUK, Y. E., TELPUHOVSKIY, E. D., TSYBIKOV, B. B. and SHINKEVICH, B. M., 2000. A comprehensive experimental study of the reaction of the ionosphere on solar eclipse March 9, 1997. *Geomagnetism i aeronomiya*. vol. 40, no. 3, pp. 94–103 (in Russian).
32. URYADOV, V. P., LEONOV, A. M. and PONYATOV, A. A., 2000. On variations of the characteristics of the HF signal on a line oblique sounding during the solar eclipse of August 11, 1999. *Izvestiya vuzov. Radiofizika*. vol. 43, no. 8, pp. 682–686 (in Russian).
33. GOKOV, A. M. and CHERNOGOR, L. F., 2000. Processes in lower ionosphere during August 11, 1999 Solar Eclipse. *Radiofizika i Radioastronomia*. vol. 5, no. 4, pp. 348–360 (in Russian).
34. FARGES, T., JODOGNE, J. C., BAMFORD, R., ROUX, Y. Le., GAUTHIER, F., VILA, P. M., ALTADILL, D., SOLE, J. G. and MIRO, G., 2001. Disturbances of the western European ionosphere during the total solar eclipse of 11 August 1999 measured by a wide ionosonde and radar network. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* vol. 63, no. 9, pp. 915–924. DOI: 10.1016/S1364-6826(00)00195-4
35. CHENG, K., HUANG, Y.-N. and CHEN S.-W. Ionospheric effects of the solar eclipse of September 23, 1987, around the equatorial anomaly crest region. *J. Geophys. Res.* vol. 97, is. A1, pp. 103–111, DOI: 10.1029/91JA02409
36. TOMÁS, A. T., LÜHR, H., FÖRSTER, M., RENTZ, S. and ROTHER, M., 2007. Observations of the low-latitude solar eclipse on 8 April 2005 by CHAMP. *J. Geophys. Res.* vol. 112, is. A6, id. A06303. DOI: 10.1029/2006JA012168
37. FOUNDA, D., MELAS, D., LYKLOUDIS, S., LISARIDIS, I., GERASOPOULOS, E., KOUVARAKIS, G., PETRAKIS, M. and ZEREFOS, C., 2007. The effect of the total solar eclipse of 29 March 2006 on meteorological variables in Greece. *Atmos. Chem. Phys.* vol. 7, is. 21, pp. 5543–5553. DOI: 10.5194/acp-7-5543-2007
38. LE, H., LIU, L., YUE, X. and WAN, W., 2008. The ionospheric responses to the 11 August 1999 solar eclipse: observations and modeling. *Ann. Geophys.* vol. 26, is. 1, pp. 107–116. DOI: 10.5194/angeo-26-107-2008
39. JAKOWSKI, N., STANKOV, S. M., WILKEN, V., BORRIES, C., ALTADILL, D., CHUM, J., BURESOVA, D., BOSKA, J., SAULI, P., HRUSKA, F. and CANDLER, Lj. R., 2008. Ionospheric behavior over Europe during the solar eclipse of 3 October 2005. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* vol. 70, no. 6, pp. 836–853. DOI: 10.1016/j.jastp.2007.02.016
40. LE, H., LIU, L., YUE, X., WAN, W. and NING, B., 2009. Latitudinal dependence of the ionospheric response to solar eclipse. *J. Geophys. Res.* vol. 114, is. A7, id. A07308. DOI: 10.1029/2009JA014072
41. KASCHEEV, S. B., ZALIZOVSKI, A. V., KOLOSKOV, A. V., GALUSHKO, V. G., PIKULIK, I. I., YAMPOLSKI, Y. M., KURKIN, V. I., LITOVKIN, G. I. and ORLOV, A. I., 2009. Frequency variations of HF signals at long-range radio paths during a solar eclipse. *Radiofizika i Radioastronomia*. vol. 14, no. 4, pp. 353–366 (in Russian).
42. ADENIYI, J. O., RADICELLA, S. M., ADIMULA, I. A., WILLOUGHBY, A. A., OLADIPO, O. A. and OLAWAPO, O., 2007. Signature of the 29 March 2006 eclipse on the ionosphere over an equatorial station. *J. Geophys. Res.* vol. 112, is. A6, id. A06314. DOI: 10.1029/2006JA012197
43. CHERNOGOR, L. F., 2010. Wave response of the ionosphere to the partial polar eclipse of August 1, 2008. *Geomagnetism and Aeronomy*. vol. 50, no. 3, pp. 346–361.
44. AKIMOV, A. L. and CHERNOGOR, L. F., 2010. Effects of the solar eclipse of August 1, 2008 on the Earth's lower atmosphere. *Kimematics and Physics of Celestial Bodies*. vol. 26, no. 3, pp. 135–145.
45. CHERNOGOR, L. F., 2010. Variations in the amplitude and phase of VLF radio waves in the ionosphere during the August 1, 2008, solar eclipse. *Geomagnetism and Aeronomy*. vol. 50, no. 1, pp. 100–110.
46. CHEN, G., ZHAO, Z., YANG, G., ZHOU, C., YAO, M., LI, T., HUANG, S. and LI, N., 2010. Enhancement and HF Doppler observations of sporadic-E during the solar eclipse of 22 July 2009. *J. Geophys. Res.* vol. 115, is. A9, id. A09325. DOI: 10.1029/2010JA015530
47. CHERNOGOR, L. F. and BARABASH, V. V., 2011. The response of the middle ionosphere to the solar eclipse of January 4, 2011 over Kharkiv: Some results of vertical sounding. *Kosmichna nauka i tekhnologiya*. vol. 17, no. 4, pp. 41–52 (in Russian).

48. GARMASH, K. P., LEUS, S. G. and CHERNOGOR, L. F., 2011. Radiophysical effects of the January 4, 2011 solar eclipse as observed in the parameters of obliquely propagating HF signals. *Radio Physics and Radio Astronomy*. vol. 2, is. 4, pp. 325–337. DOI: 10.1615/RadioPhysicsRadioAstronomy.v2.i4.50
49. CHERNOGOR, L. F., 2011. Dynamic processes in the near-ground atmosphere during the solar eclipse of August 1, 2008. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. vol. 47, no. 1, pp. 77–86.
50. CHERNOGOR, L. F., GRIGORENKO, YE. I. and LYASHENKO, M. V., 2011. Effects in geospace during partial solar eclipses over Kharkiv. *Int. J. Remote Sens.* vol. 32, no. 11, pp. 3219–3229. DOI: 10.1080/01431161.2010.541509
51. CHERNOGOR, L. F., 2012. Effects of solar eclipses in the ionosphere: Doppler sounding results: 1. Experimental data. *Geomagnetism and Aeronomy*. vol. 52, no. 6, pp. 768–778.
52. CHERNOGOR, L. F., 2012. Effects of solar eclipses in the ionosphere: Doppler sounding results: 2. Spectral analysis. *Geomagnetism and Aeronomy*, vol. 52, no. 6, pp. 779–792.
53. CHEN, G., ZHAO, Z., NING, B., DENG, Z., YANG, G., ZHOU, C., YAO, M., LI, S. and LI, N., 2011. Latitudinal dependence of the ionospheric response to solar eclipse of 15 January 2010. *J. Geophys. Res.* vol. 116, is. A6, id. A06301. DOI: 10.1029/2010JA016305
54. CHERNOGOR, L. F., 2013. Physical processes in the middle ionosphere accompanying the solar eclipse of January 4, 2011, in Kharkov. *Geomagnetism and Aeronomy*, vol. 53, no. 1, pp. 19–31.
55. BELIKOVICH, V. V., VYAKHIREV, V. D., KALINIINA, Ye. Ye., TERESHCHENKO V. D., CHERNYAEV, S. M. and TERESHCHENKO, V. A., 2007. Response of the ionosphere on the partial solar eclipse March 29, 2006 observed in Nizhny Novgorod and Murmansk *Geomagnetizm i aeronomiya*. vol. 48, no. 1. pp. 103–108 (in Russian).
56. KOVALEV, A. A., KOLESNIK, A. G. and KOLESNIK, S. A., 2009. Ionospheric effects of the solar eclipse in the middle latitudes. *Geomagnetizm i aeronomiya*. vol. 49, no. 4, pp. 500–506 (in Russian).
57. CHERNOGOR, L. F., 2008. Advanced methods of spectral analysis of quasiperiodic wave-like processes in the ionosphere: specific features and experimental results. *Geomagnetism and Aeronomy*. vol. 48, no. 5, pp. 652–673.
58. SCHUNK, R. W. and NAGY, A., 2000. *Ionospheres: physics, plasma physics, and chemistry*. Cambridge: Cambridge University Press.
59. BRYUNELLI, B. E. and NAMGALADZE, A. A., 1987. *Physics of the ionosphere*. Moscow: Nauka Publ. (in Russian).

L. F. Chernogor<sup>1</sup> and V. V. Barabash<sup>2</sup>

<sup>1</sup>V. Kazarin National University of Kharkiv, 4, Svoboda Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

<sup>2</sup>Institute of Ionosphere, National Academy of Sciences of Ukraine and Ministry of Education and Science of Ukraine, 16, Chervonopraporna St., Kharkiv, 61002, Ukraine

#### THE EFFECTS OF SOLAR ECLIPSE OF MARCH 20, 2015 OVER IONOSPHERE OF EUROPE: IONOSONDE OBSERVATIONS

The ionograms from eleven European ionosondes (Kharkiv, Moscow, Pruhonice, San Vito, et al.) have been analyzed. These ionograms were obtained during the eclipse of March 20, 2015 and the reference days. This eclipse took place against the background of the recovery phase of a very strong magnetic storm which was started on March 17, 2015. The solar eclipse effects are largely masked by the ionospheric storm effects. During the eclipse, the critical frequency  $f_oF2$  had decreased by 1–2 MHz (15–25 %), whereas decrease in electron concentration made 23–51 %. Increase in the F2-layer altitude made 10–70 km (3–20 %).

*Key words:* solar eclipse, ionosondes, critical frequency, virtual altitude variations, aperiodic disturbances, quasiperiodic disturbances

Л. Ф. Черногор<sup>1</sup>, В. В. Барабаш<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, м. Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

<sup>2</sup>Інститут іоносфери НАН і МОН України, вул. Червонопрапорна, 16, м. Харків, 61002, Україна

#### ЕФЕКТИ СОНЯЧНОГО ЗАТЕМНЕННЯ 20 БЕРЕЗНЯ 2015 Р. В ІОНОСФЕРІ НАД ЄВРОПОЮ: РЕЗУЛЬТАТИ ІОНОЗОНДОВИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Проаналізовано іонограми одинадцяти європейських іонозондів (Харків, Москва, Прухоніце, Сан Віто та ін.), отримані в день сонячного затемнення 20 березня 2015 р. та в контрольні дні. Особливістю даного затемнення було те, що воно відбувалося на тлі фази відновлення дуже сильної магнітної бурі, що почалася 17 березня 2015 р. Ефекти сонячного затемнення значною мірою маскувалися ефектами іоносферної бурі. Під час затемнення критична частота  $f_oF2$  зменшувалась на 1–2 МГц (15–25 %), а концентрація електронів на 23–51 %. Висота шару F2 збільшувалась на 10–70 км (3–20 %).

*Ключові слова:* сонячне затемнення, іонозонди, критична частота, варіації діючої висоти, аперіодичні збурення, квазіперіодичні збурення

Стаття поступила в редакцію 26 жовтня 2015 г.